

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-064614

(43)Date of publication of application : 08.03.1996

(51)Int.Cl.

H01L 21/331  
H01L 29/73  
H01L 21/203  
H01L 29/205  
H01L 29/778  
H01L 21/338  
H01L 29/812

(21)Application number : 06-202362

(71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP

(22)Date of filing : 26.08.1994

(72)Inventor : IZUMI MOICHI

KANEMOTO KYOZO

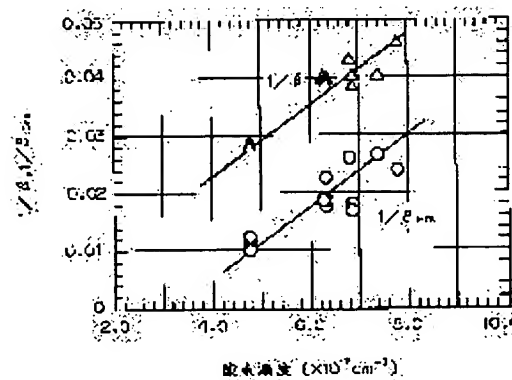
ISU TOSHIRO

(54) HETERO JUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR, ALGAS EPITAXIAL GROWTH LAYER AND CRYSTAL GROWTH METHOD

(57)Abstract:

PURPOSE: To obtain a higher current amplification factor stably by specifying an oxygen concentration in n-AlGaA of an emitter layer in a hetero junction bipolar transistor with an emitter layer containing n-AlGaAs formed by using solid state source molecular-beam epitaxy.

CONSTITUTION: In a hetero junction bipolar transistor with an emitter layer containing n-AlGaAs formed by using a solid state source molecular-beam epitaxy, contribution of a recombination current component  $\beta_{Brb}$  to an emitter base junction can be effectively reduced by making a recombination current component  $\beta_{Brb}$  at the emitter base junction smaller than the recombination current component  $\beta_{Brb}$  in a base layer. From this, it is desirable to set  $1/\beta_{Brb} < 1, 9 \times 10^{-2}$ . For this purpose, it is desirable to keep an oxygen concentration under about  $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .



---

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-64614

(43) 公開日 平成8年(1996)3月8日

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>

識別記号

片内整理番号

P I

技術表示箇所

H 0 1 L 21/331

29/73

21/203

M 9545-4M

H 0 1 L 29/72

29/205

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 21 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号

特願平6-202362

(22) 出願日

平成6年(1994)8月26日

(71) 出願人 000006013

三菱電機株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号

(72) 発明者 和泉 茂一

兵庫県伊丹市瑞原4丁目1番地 三菱電機株式会社光・マイクロ波デバイス開発研究所内

(72) 発明者 金本 恭三

兵庫県尼崎市塚口本町八丁目1番1号 三菱電機株式会社半導体基礎研究所内

(72) 発明者 井須 俊郎

兵庫県尼崎市塚口本町八丁目1番1号 三菱電機株式会社半導体基礎研究所内

(74) 代理人 弁理士 吉田 茂明 (外2名)

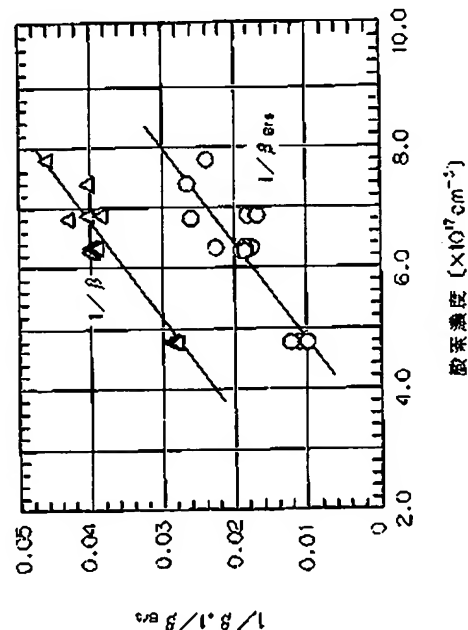
(54) 【発明の名称】 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ、AlGaAsエピタキシャル成長層及び結晶成長方法

(57) 【要約】

【目的】 固体ソース分子線エピタキシーを用いて、電流増幅率 $\beta$ が高くて安定、かつ $V_{BE}$ の温度依存係数 $|d\beta/dT|$ が小さい。ヘテロ接合バイポーラトランジスタを得ることを目的とする。

【構成】 結晶成長速度を適切に設定するなどによってエミッタ層の結晶中の酸素濃度を低減し、結晶中の酸素濃度に反比例する電流増幅率 $\beta$ を向上させる。また $V_{BE}$ の温度依存係数 $|d\beta/dT|$ を低く抑える。

【効果】 固体ソースエピタキシーによる膜厚の均一性及び制御性のよいエピタキシャル成長層をヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として用いることができる。



(2)

特開平8-64614

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 固体ソース分子線エビタキシーを用いて形成した $n\text{-AlGaAs}$ を含むエミッタ層を備えるヘテロ接合バイポーラトランジスタにおいて、前記エミッタ層の前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下にしたことを特徴とする、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項2】 固体ソース分子線エビタキシーを用いて形成した $n\text{-AlGaAs}$ を含むエミッタ層を備えるヘテロ接合バイポーラトランジスタにおいて、前記エミッタ層の前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さくしたことを特徴とする、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項3】 固体ソース分子線エビタキシーを用いて形成した $n\text{-AlGaAs}$ を含むエミッタ層を備えるヘテロ接合バイポーラトランジスタにおいて、前記エミッタ層の前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さくしたことを特徴とする、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ。

【請求項4】 固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長させた $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層において、

含有する酸素の濃度を $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下にしたことを特徴とする、 $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層。

【請求項5】 固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長させた $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層において、

含有する酸素の濃度を $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ よりも小さくしたことを特徴とする、 $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層。

【請求項6】 固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長させた $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層において、

含有する酸素の濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ よりも小さくしたことを特徴とする、 $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層。

【請求項7】 固体ソース分子線エビタキシーを用いた $\text{AlGaAs}$ の結晶成長方法において、成長速度を $0.5 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以上で結晶成長することを特徴とする、結晶成長方法。

【請求項8】 成長速度を $1.0 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以下で結晶成長することを特徴とする、請求項7記載の結晶成長方法。

【請求項9】 固体ソース分子線エビタキシーを用いた $\text{AlGaAs}$ の結晶成長方法において、 $\text{AlGaAs}$ の結晶成長用基板として $\text{GaAs}$ 基板の $(311)$  A面あるいは $(311)$  B面を用いることを特徴とする、結晶成長方法。

【請求項10】 前記 $\text{AlGaAs}$ は $n\text{-AlGaAs}$ を含み、

2

前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下に制御しつつ、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させることを特徴とする、請求項7ないし請求項9のうちのいずれか一項に記載の結晶成長方法。

【請求項11】 前記 $\text{AlGaAs}$ は $n\text{-AlGaAs}$ を含み、

前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく制御しつつ、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させることを特徴とする、請求項7ないし請求項9のうちのいずれか一項に記載の結晶成長方法。

【請求項12】 前記 $\text{AlGaAs}$ は $n\text{-AlGaAs}$ を含み、

前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく制御しつつ、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させることを特徴とする、請求項7ないし請求項9のうちのいずれか一項に記載の結晶成長方法。

【請求項13】 固体ソース分子線エビタキシーで $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ 系あるいは $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}$ 疑似整合系高電子移動度トランジスタの電子供給層に用いる $n\text{-AlGaAs}$ または $i\text{-GaAs}$ の成長用に $\text{GaAs}$ 基板に $(311)$  A面または $(311)$  B面のものを用いることを特徴とする、結晶成長方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】この発明は、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(Heterojunction Bipolar Transistor, 以下HBTという。)に関し、特に、 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ 系HBTに関するものである。また、この発明は、固体ソース分子線エビタキシー(Molecular Beam Epitaxy, 以下MBEという。)による $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層に関し、特に、 $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層中の酸素濃度に関するものである。また、この発明は、固体ソース分子線エビタキシーによる $\text{AlGaAs}$ の結晶成長方法に関し、特に、HBTのエミッタ層に用いる $n\text{-AlGaAs}$ の結晶成長方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】図12は、HBTの断面の構成を示す模式図である。図において、LEC GaAs Sub.は $(100)$ 面を有するガリウム砒素基板、Buffer2及びBuffer1はガリウム砒素基板LEC GaAs Sub.上に形成されたバッファ層、Sub Collectorはバッファ層Buffer2の上に形成されたサブコレクタ層、Collectorはサブコレクタ層Sub Collector上に形成されたコレクタ層、Baseはコレクタ層Collector上に形成されたベース層、Emitterはベース層Baseの上に形成されたエミッタ層、Emitter Cont.2及びEmitter Cont.1はエミッタ層Emitterとの電気的接続のた

(3)

特開平8-64614

3

4

めに設けられた層である。

\*【0004】

【0003】そして、それぞれの層の構成を表1に、ま

【表1】

た、一般的な成長条件を表2に示す。

\*

層名	組成	不純物濃度	厚み
Emitter Cont. 2	n-InGaAs: y=0.5	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	500Å
Emitter Cont. 1	n-InGaAs: y=0~0.5	$0.1 \sim 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	500Å
Emitter	n-AlGaAs: x=0~0.3~0	$5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	1500Å
Base	p-GaAs	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	700Å
Collector	n-GaAs	$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	5000Å
Sub Collector	n-GaAs	$5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	5000Å
Buffer 2	i-GaAs		8000Å
Buffer 1	Super Lattice: i-AlGaAs/i-GaAs=(50Å/50Å)×40cycle		

【0005】

※※【表2】

層名	成長温度 [°C]	成長速度 [ $\mu\text{m}/\text{hour}$ ]	V-Ⅲ比
Emitter Cont. 2	550~510	0.6	30~40
Emitter Cont. 1	630~560	0.3~0.6	30~50
Emitter	630	0.3~0.4	40~50
Base	630	0.3	40~50
Collector	600~630	1.0	20~30
Sub Collector	600	1.0	20~30
Buffer 2	600	1.0	20~30
Buffer 1	600	1.3/1.0	15~30

【0006】一般に、バイポーラトランジスタの性能を表すパラメータに電流伝送率 $\alpha$ と電流増幅率 $\beta$ がある。そして、電流伝送率 $\alpha$ と電流増幅率 $\beta$ には数1の関係がある。

【0007】

【数1】

$$I_c = \alpha I_E + I_{c0} \cong \alpha I_E \quad (\alpha I_E \gg I_{c0})$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\therefore I_C = \alpha (I_C + I_B)$$

$$\therefore \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \equiv \beta$$

【0008】また $\alpha$ は、数2のように示される。

【0009】

【数2】

$$\alpha = \alpha_E \alpha_T \alpha_C$$

【0010】ここで、 $\alpha_E$ は注入効率、 $\alpha_T$ は輸送効率 ( $L_E > 1 W_E$ であれば $\alpha_T$ は1にほぼ等しい)、 $\alpha_C$ はコレクタ効率である。コレクタ効率は、ほぼ1に等しい。ここでエミッタからの電流の注入効率 $\alpha_E$ が99%程度

であれば電流増幅率 $\beta$ は100程度の値になる。バイポーラトランジスタではエミッタ接地を考える場合が多く、ベース電流 $I_B$ でコレクタ電流 $I_C$ を制御する場合が多くなるので、電流増幅率 $\beta$ で論議するのが一般的である。

【0011】電流増幅率 $\beta$ の決定要因について実測を踏まえて以下のように考察する。まず、電流増幅率 $\beta$ はおおよそ数3の通り表記できる。

【0012】

【数3】

$$\beta = \frac{I_c}{I_B} = \frac{I_c}{I_{Bn} + I_{Brs} + I_{Brb}}$$

【0013】ここで、 $I_{Bn}$ は、エミッタ側に逆注入されるベース電流（真性要因）、 $I_{Brs}$ は、エミッタとベースの接合界面での再結合電流、 $I_{Brb}$ は、ベース層内での再結合電流である。

【0014】理想的にはベース電流 $I_{Bn}$ のみで電流増幅率 $\beta$ が決定されるが、実際には再結合電流 $I_{Brs}$ 、 $I_{Brb}$ が支配的になる。各 $I_B$ の項を分解すると数4のように近似できる。

(4)

特開平8-64614

5

6

【0015】

\* \* 【数4】

$$\frac{1}{\beta} = \frac{I_{Bb} + I_{Brs} + I_{Brb}}{I_c} = \frac{1}{\beta_{Bb}} + \frac{1}{\beta_{Brs}} + \frac{1}{\beta_{Brb}}$$

【0016】真性要因であるベース電流 $\beta_{Bb}$ は数5のよう  
に示される。

\* 【0020】

【数6】

【0017】

$$I_c = I_{c0} \exp \left( \frac{qV_{BE}}{n_c K T} - \frac{E_g}{K T} \right)$$

【数5】

$$\beta_{Bb} = \frac{N_e v_b^0}{P_b v_b^h} \exp \left( \frac{\Delta E_g}{K T} \right)$$

10 【0021】

【数7】

【0018】実際の結晶に於いては、再結合電流成分の  
寄与が大きく、電流増幅率 $\beta$ は $\beta_{Bb}$ では決まらない。

$$I_{Brs} = I_{B0} \exp \left( \frac{qV_{BE}}{n_B K T} - \frac{E_g}{K T} \right)$$

【0019】次に界面再結合電流 $I_{Brs}$ の電流増幅率 $\beta$   
への寄与分を見積もる。エミッタ・ベース接合部での  
 $I_{Brs}$ はそれぞれ数6、数7のように考えることがで  
きる。

【0022】

【数8】

$$\therefore \beta_{Brs} = \frac{I_c}{I_{Brs}} = \frac{I_{c0}}{I_{B0}} \exp \left[ \frac{qV_{BE}}{K T} \left( \frac{1}{n_c} - \frac{1}{n_B} \right) \right]$$

【0023】数7における $I_{c0}$ 、 $I_{B0}$ 、 $V_{BE}$ 、 $n_c$ 、 $n_B$   
はベース・エミッタ接合におけるI-V測定（ガンメル  
・プロット）から求めることができるので、各条件下で  
のエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{Brs}$ を  
見積もることができる。

$$\beta_{Bb} = \frac{I_c}{I_{Bb}} = \frac{1}{\cosh \left( \frac{W_B}{L_B} \right) - 1}$$

【0029】ここで、 $W_B$ はベース層厚、 $L_B$ はベース層  
中での拡散長を示す。

【0024】一般的には、Al組成 $x$ が高くなることで  
エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{Brs}$ が低  
くなり、AlGaAsに起因した再結合中心がエミッタ  
・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{Brs}$ に寄与してい  
る可能性が高い。

【0030】 $\beta_{Brb}$ はVBEに対して $\beta$ が飽和する値  
をもっておおよそ近似できる。また、数10、数11に  
示す関係式より各数値についても求まる。なお、 $D_B$ は  
拡散係数、 $\tau_B$ は時定数、 $\mu_B$ は電子の移動度、 $q$ は電子  
の持つ電荷の大きさ、 $K$ はボルツマン定数、 $T$ は絶対温  
度である。

【0031】

【数10】

$$L_B = \sqrt{\tau_B D_B}$$

【0025】従って、Al組成 $x$ を高くすることはベ  
ース電流 $\beta_{Bb}$ を理想的には高くできるが、実際にはエミ  
ッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{Brs}$ を低くする  
観点で不利になる。

【0032】

【数11】

$$D_B = \frac{KT\mu_B}{q}$$

【0026】最後にベース層内再結合電流の電流増幅率  
 $\beta$ への寄与分を見積もる。電流増幅率 $\beta$ のベース・エミ  
ッタ間電圧 $V_{BE}$ 依存性は、コレクタ電流 $I_c$ が大きくな  
る（ほぼ100mA）と飽和傾向を示す。

【0027】これは一位的に決定するベース層内再結合  
電流による $\beta_{Brs}$ が支配的になるためである。この様な  
場合 $\beta_{Brs}$ は、電流増幅率 $\beta$ にほぼ等しく、ベース・エ  
ミッタ間電圧 $V_{BE}$ に対して一定の傾きを持つ領域（注入  
領域）から飽和傾向に移行する。このような場合ベース  
層内での再結合電流成分 $\beta_{Brs}$ は以下のように示され  
る。

40

【0028】

【数9】

【0033】以上の計算方法を用いることで電流増幅率  
 $\beta$ の各要素を概算できる。その結果、固体ソースMBE  
で成長した結晶で構成されたHBTに於ける電流増幅率  
 $\beta$ の決定要因を3つに分類した場合、数12の関係が成  
り立つ。但し、この関係は後述するように $\beta_{Bb}$ が $n$ -  
AlGaAsエミッタ層中酸素濃度に依存するので、 $1$   
 $/\beta_{Brs} > 1/\beta_{Bb}$ となる場合もあり得る。

【0034】

50 【数12】

(5)

特開平8-64614

$$\frac{1}{\beta_{\text{Dro}}} > \frac{1}{\beta_{\text{Ars}}} > \frac{1}{\beta_{\text{As}}}$$

【0035】エミッタ層A1組成xによって決定する理想的な電流増幅率 $\beta$  ( $\beta_{\text{As}}$ )は実測値からは得られず、現状のHBT結晶ではベース層内再結合電流成分 $\beta_{\text{Ars}}$ 及びエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{Dro}}$ の寄与が支配的である。ベース層内での再結合電流成分 $\beta_{\text{Ars}}$ は $\beta$ の最も支配的な決定要因ではあるが、エピタキシャル層構造(ベース濃度やベース層厚)に大きく依

存する。  
【0036】次に、実際に酸素が、HBT結晶中にとどのように入れているかを2次イオン質量分析法(SIMS)を用いて調べた結果を図13に示す。MOCVDで成長した試料には全領域で酸素は検出限界以下であり \*

\* (AlGaAsの検出限界は $1/10^{11} \text{ cm}^{-3}$ より大きい範囲、GaAsの検出限界は $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ より大きい範囲である。これらの検出限界の違いはマトリクスの違いによる。) 電流増幅率 $\beta$ は52.60が得られた。これに対してMBEで成長した結晶にはAlGaAsで形成されているエミッタ層全域に酸素が $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 程度検出された。

【0037】特に、エミッタ・ベース接合部に著しい偏析が観察された。電流増幅率 $\beta$ はAlGaAsの組成で決まる真性要因のように大きな差はなく、これらのDC測定結果を結晶中混入酸素量と対比させたものを表3にまとめる。結晶中酸素濃度と電流増幅率 $\beta$ について相対関係があることが以下の表から顕微される。

【0038】

【表3】

A1組成	成長方法	$\Delta E_g$	$\beta_{\text{As}}$	$\beta$	E/B接合での酸素濃度	Emitter層での酸素濃度
0.22	MBE	0.161eV	148	21.64	$1.74 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	$5.7 \sim 9.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
0.26	MBE	0.190eV	456	23.12	$1.47 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$5.0 \sim 8.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
0.30	MBE	0.219eV	1412	24.76	$1.63 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$5.3 \sim 9.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
0.30	MOCVD	0.219eV	1412	52.60	検出限界以下	検出限界以下

【0039】MOCVDを用いて結晶成長した場合の方がMBEを用いるよりも混入酸素の濃度が低い理由としては、(1)成長温度が高い(MOCVDではAlGaAs成長時の成長温度がほぼ750℃に対してMBEではほぼ640℃)、(2)AsH<sub>3</sub>等から生じる活性な水素(H<sup>+</sup>)の影響が考えられる。

【0040】以上に示すデータから、酸素の混入量低減化といった観点では、MOCVDのMBEに対する優位性が認知される。しかし、膜厚の均一性、制御性ではMBEが結晶成長方法として最も優れている。従って、MBEを用いてMOCVDと同等の電流増幅率 $\beta$ を有するHBTを製造可能にすることで、膜厚の均一性及び制御性の良いHBTの製造方法の提供が可能になる。

【0041】

【発明が解決しようとする課題】以上のように従来のHBTの再重要パラメータの一つである直流電流増幅率 $\beta$ は、AlGaAs/GaAs系HBTにおいてはエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{Dro}}$ の寄与が大きい。しかし、再結合電流成分 $\beta_{\text{Ars}}$ を十分に制御することができず、高い電流増幅率 $\beta$ を得ることができないという問題点があった。

【0042】また、固体ソースMBEによって作成されたHBTにおける問題点の一つに、ベース・エミッタ間電圧 $V_{\text{BE}}$ の温度依存係数が高くなると、エミッタフィンガーを数十本集積して高出力素子等を構成した場合に、各フィンガー毎の $V_{\text{BE}}$ の違いが助長され結果としてあるフィンガーに電流が集中し、素子破壊の原因とな

る。

【0043】その値が結晶成長毎に安定しない場合、高出力素子を設計する場合の耐圧が低くなる等の問題も生じる。

【0044】この発明は上記のような問題点を解消するためになされたもので、つまり電流増幅率 $\beta$ は高く且つ安定であることが好ましく、より高い電流増幅率 $\beta$ を安定に得ることを目的としている。

【0045】また、ベース・エミッタ間電圧 $V_{\text{BE}}$ の温度依存係数を低く抑えて安定した高出力動作を可能とするHBTを提供することを目的とする。

【0046】また、高電子移動度トランジスタにおいて、電子供給層のキャリアの活性化率を向上させ、シートキャリア濃度 $N_s$ の増化に伴う、相互コンダクタンス $g_m$ の増化、雑音指数NFの低減、出力特性等の改善を目的とする。

【0047】

【課題を解決するための手段】第1の発明に係るヘテロ接合バイポーラトランジスタは、固体ソース分子線エピタキシーを用いて形成したn-AlGaAsを含むエミッタ層を備えるヘテロ接合バイポーラトランジスタであって、前記エミッタ層の前記n-AlGaAs中の酸素濃度が $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 以下になるようにしている。

【0048】第2の発明に係るヘテロ接合バイポーラトランジスタは、固体ソース分子線エピタキシーを用いて形成したn-AlGaAsを含むエミッタ層を備えるヘテロ接合バイポーラトランジスタであって、前記エミ

(5)

特開平8-64614

9

タ層の前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さくするようにしている。

【0049】第3の発明に係るヘテロ接合バイポーラトランジスタは、固体ソース分子線エビタキシーを用いて形成した $n\text{-AlGaAs}$ を含むエミッタ層を備えるヘテロ接合バイポーラトランジスタであって、前記エミッタ層の前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さくするようにしている。

【0050】第4の発明に係るエビタキシャル成長層は、固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長させた $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層であって、含有する酸素の濃度を $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下にするようにしている。

【0051】第5の発明に係るエビタキシャル成長層は、固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長させた $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層であって、含有する酸素の濃度を $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ よりも小さくするようにしている。

【0052】第6の発明に係るエビタキシャル成長層は、固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長させた $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層であって、含有する酸素の濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ よりも小さくしている。

【0053】第7の発明に係る結晶成長方法は、固体ソース分子線エビタキシーを用いた $\text{AlGaAs}$ の結晶成長方法であって、成長速度を $0.5 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以上で結晶成長するようにしている。

【0054】第8の発明に係る結晶成長方法は、第7の発明の結晶成長方法において、成長速度を $1.0 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以下で結晶成長するようにしている。

【0055】第9の発明に係る結晶成長方法は、固体ソース分子線エビタキシーによる $\text{AlGaAs}$ の結晶成長用基板として $\text{GaAs}$ 基板の(311)A面あるいは(311)B面を用いるようにしている。

【0056】第10の発明に係る結晶成長方法は、第7乃至第9の発明のいずれかにおいて、前記 $\text{AlGaAs}$ は $n\text{-AlGaAs}$ を含み、前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下に制御しつつ、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるものである。

【0057】第11の発明に係る結晶成長方法は、第7乃至第9の発明のいずれかにおいて、前記 $\text{AlGaAs}$ は $n\text{-AlGaAs}$ を含み、前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく制御しつつ、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるものである。

【0058】第12の発明に係る結晶成長方法は、第7乃至第9の発明のいずれかにおいて、前記 $\text{AlGaAs}$ は $n\text{-AlGaAs}$ を含み、前記 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく制御しつつ、ヘ

10

テロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるものである。

【0059】第13の発明に係る結晶成長方法は、固体ソース分子線エビタキシーで $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ 系あるいは $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}$ 疑似整合系高電子移動度トランジスタの電子供給層に用いる $n\text{-AlGaAs}$ または $p\text{-GaAs}$ の成長用に $\text{GaAs}$ 基板に(311)A面または(311)B面のものを用いるようにする。

【0060】

【作用】第1の発明におけるエミッタ層は、それを構成している $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度が $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下で、そのため、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響をベース層内での再結合電流成分の影響より小さくする。

【0061】第2の発明におけるエミッタ層は、それを構成している $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度が $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく、そのため、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響をベース層内での再結合電流成分の影響より十分に小さくする。

【0062】第3の発明におけるエミッタ層は、それを構成している $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度が $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく、そのため、温度依存係数 $\phi$ を $1.2 \text{ mV}$ 以下に抑えることができる。

【0063】第4の発明におけるエビタキシャル成長層は、固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長された膜厚の均一性及び制御性の良い $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層で、含有する酸素の濃度が $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下で、例えば、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響をベース層内での再結合電流成分の影響より小さくできるなどヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として適したものである。

【0064】第5の発明におけるエビタキシャル成長層は、固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長された膜厚の均一性及び制御性の良い $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層で、含有する酸素の濃度が $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく、例えば、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響をベース層内での再結合電流成分の影響より十分に小さくできるなどヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として適したものである。

【0065】第6の発明におけるエビタキシャル成長層は、固体ソース分子線エビタキシーによって結晶成長された膜厚の均一性及び制御性の良い $\text{AlGaAs}$ エビタキシャル成長層で、含有する酸素の濃度が $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく、例えば温度依存係数 $\phi$ を $1.2 \text{ mV}$ 以下に抑えることができるなどヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として適したものである。

【0066】第7の発明における結晶成長の成長速度



(7)

特開平8-64614

11

は、 $0.5 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以上で、固体ソース分子線エビタキシーでも含有する酸素の濃度を、例えばHBTの電流増幅率を改善できる程度に低く抑えることができる。

【0067】第8の発明における結晶成長の成長速度は、 $1.0 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以下で、良好な結晶状態を保ちつつ、固体ソース分子線エビタキシーでも含有する酸素の濃度を、例えばHBTの電流増幅率を改善できる程度に低く抑えることができる。

【0068】第9の発明におけるGaAs基板の(311)A面あるいは(311)B面は、固体ソース分子線エビタキシーの結晶成長用基板として用いることで、得られるAlGaAsエビタキシャル成長層の酸素含有量を(100)面を用いるのに比べて少なくすることができる。

【0069】第10の発明におけるn-AlGaAsは、含有する酸素濃度が $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下で、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響をベース層内での再結合電流成分の影響より小さくする。

【0070】第11の発明におけるn-AlGaAsは、含有する酸素濃度が $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ より小さく、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響をベース層内での再結合電流成分の影響より十分に小さくする。

【0071】第12の発明におけるn-AlGaAsは、含有する酸素濃度が $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ より小さく、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として、温度依存係数を $1.2 \text{mV}$ 以下に抑えることができる。

【0072】第13の発明におけるGaAs基板に(311)A面または(311)B面は、成長したAlGaAs/GaAs系あるいはAlGaAs/InGaAs疑似整合系高電子移動度トランジスタの電子供給層に用いるn-AlGaAsの酸素の含有量を小さく抑える。

【0073】

【実施例】

実施例1. 以下、この発明の第1実施例を図について説明する。図1及び図2は、固体ソース分子線エビタキシーを用いて形成したn-AlGaAs中の混入酸素量と電流増幅率 $\beta$ との関係を定量的に対応を示すグラフである。図1のグラフにおいて、横軸はエミッタ層中に混入した酸素濃度、縦軸は電流増幅率 $\beta$ 及びエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{rec}}$ である。図2のグラフにおいて、横軸はエミッタ・ベース接合部に偏析した酸素濃度、縦軸は電流増幅率 $\beta$ 及びエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{rec}}$ である。

【0074】また、エミッタ層中の混入酸素濃度(平均値)とエミッタ・ベース接合部偏析酸素濃度(ピーク

12

値)との関係を図3に示す。

【0075】なお、これらのデータを得るための実験は、成長速度はAs圧一定下でGaフラックスのみを変化させて行っているが、その際にV/III比も変化する。実験では、標準的な成長条件以外にエミッタ・ベース接合部での成長速度を変化させている。

【0076】成長前処理は真空中加熱 $350^\circ\text{C}$ 、30分、As圧下 $650^\circ\text{C}$ 、10分とした。成長条件の詳細については、S.Izumi, M.Yoshida, H.Takano, Nishitani, M.Otsubo, J.Cryst.Growth 133, 123-131に記載されていると同様に行った。Asのクラッキング(cracking)は $700^\circ\text{C}$ 一定とした。

【0077】そして、エビタキシャル成長させた結晶を用いてHBTを試作した。試作したHBTのエミッタサイズは $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ である。電流増幅率 $\beta$ の測定点は、コレクタ電流 $I_c = 100 \text{mA}$  ( $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ )、電流密度にして $4 \times 10^4 \text{A}/\text{cm}^2$ である。ガンメルプロットにおけるエミッターコレクタ間電圧 $V_{\text{CE}} = 3.0 \text{V}$ とし、この条件下で $nC$ 、 $nB$ を測定した。酸素の定量はAlGaAs定量用校正標準試料を用いて、2次イオン質量分析法(SIMS)で行った。

【0078】以上の関係から明らかのように、酸素の混入量の低減が電流増幅率 $\beta$ の向上に対してリニアに影響していることがわかる。また、 $1/\beta$ 及び $1/\beta_{\text{rec}}$ の酸素濃度に対する変化量が等しいことから、エビタキシャル成長層の同一構造での電流増幅率 $\beta$ の違いはエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{rec}}$ の寄与の違いと考えられ、ベースからエミッタ層へのAlGaAs層の結晶性(混入酸素量の多少)が電流増幅率 $\beta$ の初期値を決定する重要な要因であることが分かる。

【0079】数12で示したように現状のMBEで成長したHBTの結晶ではベース層内での再結合電流成分 $\beta_{\text{rec}}$ が支配的であり、このパラメータは結晶構造(ベース濃度、ベース層厚等)でほとんど決まってしまう。従って、まず、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{rec}}$ をベース層内での再結合電流成分 $\beta_{\text{rec}}$ と比較して小さくできればよいことになる。

【0080】そこで、ベース層内での再結合電流成分 $\beta_{\text{rec}}$ について考察する。拡散長 $L_B$ が $2900 \sim 3100$ オングストロームとばらついて来る。そこで、ベース濃度が $1.2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ で、ベース層厚が $700$ オングストロームとすると、数9によれば、 $L_B = 2900$ オングストロームの場合は、 $\beta_{\text{rec}} = 2.927 \times 10^{-2}$ であり、 $L_B = 3100$ オングストロームの場合は、 $\beta_{\text{rec}} = 2.56 \times 10^{-2}$ である。

【0081】これに対して図1から $\beta_{\text{rec}}$ を求めると、 $1/\beta_{\text{rec}}$ が $1/\beta - 1/\beta_{\text{rec}}$ にほぼ等しい。これは図1より求められる。 $1/\beta_{\text{rec}}$ は常に一定であると仮定しているので、 $1/\beta_{\text{rec}} = 0$ となるx切片での $1/\beta$ の値が $1/\beta_{\text{rec}}$ になる。

(8)

特開平8-64614

13

【0082】これは直線をどのように引くかに依存するが、大きく見積もっても $2 \cdot 0 \times 10^{-2}$ 程度で、数9から求められる $\beta_{s,b}$ 一致しない。これは数9で $\beta_{s,b} = \beta$ と仮定した $V_E$ が十分に $\beta$ を飽和させていない値であったことが主な原因であり、正確には $V_E$ に対して $\beta$ が飽和した値はもう少し高く、 $1/\beta_{s,b} (= 1/\beta)$ は $2 \cdot 69 \times 10^{-2}$ より低くなるのは妥当と考えられる。従って、図1より求めた $1/\beta_{s,b} = 1 \cdot 9 \times 10^{-2}$ （ベース層内での再結合電流成分 $\beta_{s,b}$ が主要因とした場合の電流増幅率は52.6である。）の方がより正確な値といえる。

【0083】エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{s,s}$ をベース層内での再結合電流成分 $\beta_{s,b}$ より小さくすることによって、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{s,s}$ の寄与を効果的に減少させることができる。このことから、好ましくは、 $1/\beta_{s,s} < 1 \cdot 9 \times 10^{-2}$ とすればよい。そのためには、図1に示したグラフから酸素濃度が $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度以下にすることが望ましいことがわかる。

【0084】さらに好ましくは、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{s,s}$ をベース層内での再結合電流成分 $\beta_{s,b}$ と比較して十分に小さくできればよい。そこで、 $1/\beta_{s,s}$ を十分小さな値である $2 \times 10^{-3}$ （ベース層内での再結合電流成分 $\beta_{s,s}$ が主要因とした場合の電流増幅率は500である。）程度より小さくするには、図1を用いて逆算すると、低減すべき酸素濃度はAlGaAsで形成されたエミッタ層中で $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さいと見積もることができる。

【0085】一般に、成長条件パラメータとしては、(1)成長温度、(2) $V/III$ 比、(3)成長速度がある。更に、4番目の項目として、Kazuo Watanabe, Hazime Yamazaki, and Kazum Wada, Appl. Phys. Lett. 59, 3407-3409 (1991)に記載されている成長開始からの経時変化（Alメルトのガスだし状況に対応する。）がある。

【0086】これらの項目の中で最も大きくデバイスパラメータに影響するファクターは、成長速度が該当する。成長速度を変えてエピタキシャル成長層の形成を行った実験結果の一例を図4に示す。図4は成長速度とフォトルミネッセンスの発光寿命との関係を示すグラフである。

【0087】また、評価した単一量子井戸（以下SQWという。）のエピタキシャル成長層の構造は図5に示す。図5において、50はGaAsで形成された井戸層、51、52は井戸層50を挟むAl<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Asで形成された層である。固体ソースMBEにより形成されたエピタキシャル成長層の成長速度依存性については、井戸層50であるGaAs層のみ励起し、その際に発せられる発光寿命によって評価した。そして、SQWの発光寿命は、数13のような関係式で示される。

【0088】

14

【数13】

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr,b}} + \frac{2S}{d}$$

【0089】ここで、 $\tau$ はSQWの発光寿命、 $\tau_r$ は輻射再結合寿命、 $\tau_{nr,b}$ は非輻射再結合寿命でバルク再結合成分と界面再結合成分に分類できる。 $\tau_{nr,b}$ は非輻射再結合寿命でバルク再結合成分を示し、 $S$ は界面再結合速度である。AlGaAs/GaAsヘテロ界面での再結合速度は、ほぼ $10^4 \text{ cm/sec}$ オーダーと一般的に大きく、GaAs井戸層40が薄い場合には発光寿命が極端に短くなるため、井戸層厚は1000オングストロームとする。

【0090】成長速度が $0 \cdot 3 \mu\text{m/h}$ のが最も発光寿命が長く、成長速度を増すに従い発光寿命が長くなり、成長速度 $0 \cdot 7 \mu\text{m/h}$ で最大値を得ることができる。

【0091】成長速度を増加させることで発光寿命が長くなるのは、雰囲気中に残存する酸素取り込み量が単位時間当たり一定であるので、成長時間が短くなることで酸素取り込みの絶対値が減少することによると考えられる。また、成長速度が $1 \cdot 0 \mu\text{m/h}$ で発光寿命が短くなるのは、成長モードがステップフローモードから2次元成長モードに移行するための結晶性の劣化ではないかと考えられる。

【0092】ステップフローの成長をより完全に行うことで不純物の取り込み（特にII, VI族）が低減することには、M.Kondo, C.Anayama, T.Tanahashi, and S.Yamazaki, J.Cryst.Growth 124, (1992)449に記載されている。

【0093】同様の傾向が井戸層を1000オングストロームとした場合の第一準位からのPL測定からも観察される。

【0094】MBEの成長速度を変化させた場合のSQW第一準位からのPL発光の依存性を図6にまとめる。図6は、GaAs/AlGaAs単一量子井戸第一準位からのフォトルミネッセンス発光の半値幅、発光波長及び発光強度の成長速度依存性を示すグラフである。図6において、横軸は成長速度、縦軸はそれぞれ半値幅、発光波長、発光強度を示す。また、評価した単一量子井戸（SQW）のエピタキシャル成長層の構造は図7に示す。図7において、70はGaAsで形成された井戸層、71、72は井戸層70を挟むAl<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Asで形成された層である。それぞれの層の厚さは、井戸層70が1000オングストローム、井戸層を挟むAl<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As層71、72が2000オングストロームである。

【0095】図6は、第一準位からのPL発光は成長速度が $0 \cdot 7 \mu\text{m/h}$ の場合に半値幅が最小値（3.89 meV）になる。

【0096】また、井戸層厚1000オングストロームの場合、第一準位からの発光波長は計算では7970オン

(9)

特開平8-64614

15

グストロームになるが、実測値はこの波長よりも長く、また成長速度が遅いほどより長波側にシフトする。これらの結果は成長速度が $0.7 \mu\text{m/h}$ で $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ヘテロ界面の品質が最も良好であることを示し、時分解PLの結果と同様な傾向を示す。  
 【0097】以上の実験結果より、成長速度を現状の $0.3 \mu\text{m/h}$ から $0.7 \mu\text{m/h}$ まで増大させることで、再結晶に寄与する成分の低減化が可能であると推測\*

16

\*できる。この成長条件の寄与をHBTの成長条件に適用し、電流増幅率 $\beta$ との対応を調べた。

【0098】成長速度 $0.3 \mu\text{m/h}$ と $0.5 \mu\text{m/h}$ で成長したHBT結晶中酸素濃度の深さ方向プロファイルを図8に示す。同様な結晶でHBTを試作し、DC測定の結果と対応付けた結果を表4にまとめる。

【0099】

【表4】

成長速度	成長方法	$\beta$	E/B接合での酸素濃度	Emitter層での酸素濃度
$0.3 \mu\text{m/h}$	MBE	26.02	$1.26 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$5.8 \sim 3.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
$0.5 \mu\text{m/h}$	MBE	35.43	$0.70 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$3.8 \sim 5.7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

【0100】HBT結晶の成長速度を上げることで結晶中酸素濃度が低減され、電流増幅率 $\beta$ も向上していることが分かる。

【0101】なお、上記第1実施例では、成長速度を変えることによって結晶中の酸素濃度を変化させたが、他の要素、例えば、成長温度や $V/II$ 比等を変えて結晶中の酸素濃度を変化させても良く上記実施例と同様の効果を奏する。

【0102】実施例2。次に、この発明の第2実施例を図について説明する。図9は、複数のHBT間の結晶中の酸素濃度のばらつきを示すグラフである。図において、縦軸にはHBTの結晶中の酸素濃度、横軸には表面からの深さを目盛っている。図には、試料①から⑤についての酸素濃度が示されており、酸素濃度以外の因子については、製造工程上同じと思われる。

【0103】ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ のばらつきとHBTの結晶中の酸素濃度との関係を明らかにするために、試料①から試料⑤について、HBTの結晶中の酸素濃度と温度依存係数 $\phi$ との関係を示すグラフを図10に示す。図において、横軸にはHBTの結晶中の酸素濃度、縦軸には温度依存係数 $\phi$ を目盛っている。

【0104】図10から分かるように、HBTの温度依存係数 $\phi$ と結晶中の酸素濃度との間には、明瞭な相関があり、HBT結晶中酸素濃度の低下に伴い、ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ が低下している。ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ を結晶中酸素濃度により制御できる。ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ は、1.2以下に抑えることが望ましく、従って、酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下に\*

※下に抑えることが望ましい。 $1 \leq \phi < 1.2$ はHBTで高出力素子を形成する場合に実用化する上で一つの目安となる数値である。

【0105】次に、エミッタ抵抗の温度及びバンドギャップの温度を考慮した場合のベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ について検討する。エミッタ電流 $I_E$ は数14で与えられる。

【0106】

【数14】

$$I_E = I_0(T) \exp \left[ \frac{qV_{BE} - E_g}{kT} \right]$$

$$(\text{但し、} V_{BE} = V_{BE} - R_E I_E)$$

【0107】エミッタ電流 $I_E$ の温度依存性を考慮して式を変形すると数15が得られ、それを数14を用いてさらに変形して数16が与えられる。

【0108】

【数15】

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_E}{\partial T} = & \left[ \frac{\partial I_0}{\partial T} + I_0(T) \left\{ -\frac{qV_{BE} - E_g}{kT^2} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{q}{kT} \left( \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} - \frac{\partial E_g}{\partial T} \right) \right\} \right] \\ & \times \exp \left[ \frac{qV_{BE} - E_g}{kT} \right] \end{aligned}$$

【0109】

【数16】

$$\begin{aligned} \frac{1}{I_E} \frac{\partial I_E}{\partial T} = & \frac{1}{I_0} \frac{\partial I_0}{\partial T} + \frac{E_g - qV_{BE}}{kT^2} \\ & + \frac{q}{kT} \frac{\partial}{\partial T} (V_{BE} - I_E R_E) - \frac{q}{kT} \frac{\partial E_g}{\partial T} \end{aligned}$$

(10)

特開平8-64614

17

18

【0110】 $\partial I_E / \partial T = 0$  (但し、 $I_E$ は一定) とい \* 【0111】  
う条件のもとでは、数17が成り立つ。 \* 【数17】

$$\left. \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \right|_{I_E} = \phi$$

$$= - \frac{kT}{q} \left[ \frac{1}{I_0} \frac{\partial I_0}{\partial T} + \frac{E_s - qV_{BE}}{kT^2} \right]$$

$$+ I_E \frac{\partial R_s}{\partial T} + \frac{\partial E_s}{\partial T}$$

【0112】 $\partial R_s / \partial T = 0$ の時、ベース・エミッタ \* 【0113】  
間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ の値は、 $I_E$ を増加させる 【数18】  
と飽和することから数18が導かれる。 \*

$$\phi = - \frac{kT}{q} \left[ \frac{1}{I_0} \frac{\partial I_0}{\partial T} + \frac{E_s - qV_{BE}}{kT^2} \right]$$

$$+ \frac{\partial E_s}{\partial T}$$

【0114】ここで、 $I_0$ が $T^n$ に比例するとすると数1 \* 【0115】  
9が導かれる。 ★ 【数19】

$$\phi = - \frac{1}{T} \frac{kT}{q} \left[ n + \frac{E_s - qV_{BE}}{kT} \right] + \frac{\partial E_s}{\partial T}$$

【0116】そして、 $n$ が3程度、 $E_s - qV_{BE}$ が0. \*  
1V程度、 $\partial E_s / \partial T$ が-0.4mV/K程度とする \*  
と、数19からベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存 \*  
係数 $\phi$ がほぼ-1.1mV/Kから-1.2mV/K程度と \*  
なる。エミッタ電流 $I_E$ の増加に伴う温度上昇によるH \*  
BTの破壊を防止するためには、ベース・エミッタ間電 \*  
圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ の絶対値を1.2mV/Kより \*  
小さくするのが望ましいことがわかる。

【0117】実施例3. 次に、この発明の第3実施例を \*  
図について説明する。実施例1にもあるように、PL \*  
光寿命の長短は酸素混入による再結合準位の形成と深い \*  
係わりがある。従って光寿命の長い状態をHBTの結 \*  
晶成長に適用することが高い電流増幅率 $\beta$ を得ること \*  
につながり、その寿命を一定にすることが電流増幅率 $\beta$ を \*  
安定にすることを意味する。

【0118】図11に $Al_{0.3}Ga_{0.7}As / In_{0.1}Ga_{0.9}As / Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  単一量子井戸 (SQ \*  
W) からのPL光寿命の成長基板方位依存性を示 \*  
す。

【0119】図11から実施例1で用いている結晶成長 \*  
用の(100)面基板に対して、(311)A面基板を \*  
用いると、光寿命が約3倍と長くなることがわかる。 \*  
そのことから、高成長速度での $n-AlGaAs$ 中酸素 \*  
濃度は約1/4に低減されることがわかる。

【0120】この(311)A面基板を用いてHBTを \*  
成長した場合、成長速度が0.3 $\mu m/h$ の場合で酸素 \*  
濃度は、エミッタ層中平均値で $2 \times 10^{17} cm^{-3}$ 以下に \*  
なる。この場合電流増幅率 $\beta$ はベース層内での再結合電 \*  
流成分 $\beta_{sc}$ で決定される領域に至り、電流増幅率 $\beta$ で \*  
40程度の値が得られる。成長速度が0.5 $\mu m/h$ の \*  
場合には酸素濃度が $AlGaAs$ 層中で $1 \times 10^{17} cm^{-3}$  \*  
以下に至り、同様に電流増幅率 $\beta$ で40の値が得られ \*  
る。

【0121】上記のように(311)A面上にHBTを \*  
成長することで少数キャリアの寿命が(100)面上に \*  
成長した場合に比較して長くなることで、電流増幅率 $\beta$  \*  
で40とベース層内での再結合電流成分 $\beta_{sc}$ によって \*  
決まる値に安定する。これは $n-AlGaAs$ 中混入酸素 \*  
量を低減できたことに起因する。

【0122】(311)B面上においても(100)面 \*  
上に成長した場合に比較して電流増幅率 $\beta$ が改善され \*  
る。

【0123】実施例4. 次に、この発明の第4実施例に \*  
よる高電子移動度トランジスタの製造方法について説明 \*  
する。図14は、 $InGaAs / GaAs$ 系擬似整合系 \*  
高電子移動度トランジスタの構造を示す断面図である。 \*  
図において、101はソース、102はゲート、103 \*  
はドレイン、104はソース101の下に形成された $n-$  \*  
 $GaAs$ 層、105はドレイン103の下に形成され \*  
た $n+-GaAs$ 層、106はゲート102及び $n+-$  \*  
 $GaAs$ 層104、105の下に形成され電子供給層と \*  
して働く $n-AlGaAs$ 層、107は $n-AlGaAs$  \*  
層、108は $p-AlGaAs$ 層、109は $p-GaAs$ 層、110は \*  
 $p-GaAs$ 層、111は $p-GaAs$ 層、112は $p-GaAs$ 層、 \*  
113は $p-GaAs$ 層、114は $p-GaAs$ 層、115は $p-GaAs$  \*  
層、116は $p-GaAs$ 層、117は $p-GaAs$ 層、118は \*  
 $p-GaAs$ 層、119は $p-GaAs$ 層、120は $p-GaAs$ 層、 \*  
121は $p-GaAs$ 層、122は $p-GaAs$ 層、123は $p-GaAs$  \*  
層、124は $p-GaAs$ 層、125は $p-GaAs$ 層、126は \*  
 $p-GaAs$ 層、127は $p-GaAs$ 層、128は $p-GaAs$ 層、 \*  
129は $p-GaAs$ 層、130は $p-GaAs$ 層、131は $p-GaAs$  \*  
層、132は $p-GaAs$ 層、133は $p-GaAs$ 層、134は \*  
 $p-GaAs$ 層、135は $p-GaAs$ 層、136は $p-GaAs$ 層、 \*  
137は $p-GaAs$ 層、138は $p-GaAs$ 層、139は $p-GaAs$  \*  
層、140は $p-GaAs$ 層、141は $p-GaAs$ 層、142は \*  
 $p-GaAs$ 層、143は $p-GaAs$ 層、144は $p-GaAs$ 層、 \*  
145は $p-GaAs$ 層、146は $p-GaAs$ 層、147は $p-GaAs$  \*  
層、148は $p-GaAs$ 層、149は $p-GaAs$ 層、150は \*  
 $p-GaAs$ 層、151は $p-GaAs$ 層、152は $p-GaAs$ 層、 \*  
153は $p-GaAs$ 層、154は $p-GaAs$ 層、155は $p-GaAs$  \*  
層、156は $p-GaAs$ 層、157は $p-GaAs$ 層、158は \*  
 $p-GaAs$ 層、159は $p-GaAs$ 層、160は $p-GaAs$ 層、 \*  
161は $p-GaAs$ 層、162は $p-GaAs$ 層、163は $p-GaAs$  \*  
層、164は $p-GaAs$ 層、165は $p-GaAs$ 層、166は \*  
 $p-GaAs$ 層、167は $p-GaAs$ 層、168は $p-GaAs$ 層、 \*  
169は $p-GaAs$ 層、170は $p-GaAs$ 層、171は $p-GaAs$  \*  
層、172は $p-GaAs$ 層、173は $p-GaAs$ 層、174は \*  
 $p-GaAs$ 層、175は $p-GaAs$ 層、176は $p-GaAs$ 層、 \*  
177は $p-GaAs$ 層、178は $p-GaAs$ 層、179は $p-GaAs$  \*  
層、180は $p-GaAs$ 層、181は $p-GaAs$ 層、182は \*  
 $p-GaAs$ 層、183は $p-GaAs$ 層、184は $p-GaAs$ 層、 \*  
185は $p-GaAs$ 層、186は $p-GaAs$ 層、187は $p-GaAs$  \*  
層、188は $p-GaAs$ 層、189は $p-GaAs$ 層、190は \*  
 $p-GaAs$ 層、191は $p-GaAs$ 層、192は $p-GaAs$ 層、 \*  
193は $p-GaAs$ 層、194は $p-GaAs$ 層、195は $p-GaAs$  \*  
層、196は $p-GaAs$ 層、197は $p-GaAs$ 層、198は \*  
 $p-GaAs$ 層、199は $p-GaAs$ 層、200は $p-GaAs$ 層、 \*  
201は $p-GaAs$ 層、202は $p-GaAs$ 層、203は $p-GaAs$  \*  
層、204は $p-GaAs$ 層、205は $p-GaAs$ 層、206は \*  
 $p-GaAs$ 層、207は $p-GaAs$ 層、208は $p-GaAs$ 層、 \*  
209は $p-GaAs$ 層、210は $p-GaAs$ 層、211は $p-GaAs$  \*  
層、212は $p-GaAs$ 層、213は $p-GaAs$ 層、214は \*  
 $p-GaAs$ 層、215は $p-GaAs$ 層、216は $p-GaAs$ 層、 \*  
217は $p-GaAs$ 層、218は $p-GaAs$ 層、219は $p-GaAs$  \*  
層、220は $p-GaAs$ 層、221は $p-GaAs$ 層、222は \*  
 $p-GaAs$ 層、223は $p-GaAs$ 層、224は $p-GaAs$ 層、 \*  
225は $p-GaAs$ 層、226は $p-GaAs$ 層、227は $p-GaAs$  \*  
層、228は $p-GaAs$ 層、229は $p-GaAs$ 層、230は \*  
 $p-GaAs$ 層、231は $p-GaAs$ 層、232は $p-GaAs$ 層、 \*  
233は $p-GaAs$ 層、234は $p-GaAs$ 層、235は $p-GaAs$  \*  
層、236は $p-GaAs$ 層、237は $p-GaAs$ 層、238は \*  
 $p-GaAs$ 層、239は $p-GaAs$ 層、240は $p-GaAs$ 層、 \*  
241は $p-GaAs$ 層、242は $p-GaAs$ 層、243は $p-GaAs$  \*  
層、244は $p-GaAs$ 層、245は $p-GaAs$ 層、246は \*  
 $p-GaAs$ 層、247は $p-GaAs$ 層、248は $p-GaAs$ 層、 \*  
249は $p-GaAs$ 層、250は $p-GaAs$ 層、251は $p-GaAs$  \*  
層、252は $p-GaAs$ 層、253は $p-GaAs$ 層、254は \*  
 $p-GaAs$ 層、255は $p-GaAs$ 層、256は $p-GaAs$ 層、 \*  
257は $p-GaAs$ 層、258は $p-GaAs$ 層、259は $p-GaAs$  \*  
層、260は $p-GaAs$ 層、261は $p-GaAs$ 層、262は \*  
 $p-GaAs$ 層、263は $p-GaAs$ 層、264は $p-GaAs$ 層、 \*  
265は $p-GaAs$ 層、266は $p-GaAs$ 層、267は $p-GaAs$  \*  
層、268は $p-GaAs$ 層、269は $p-GaAs$ 層、270は \*  
 $p-GaAs$ 層、271は $p-GaAs$ 層、272は $p-GaAs$ 層、 \*  
273は $p-GaAs$ 層、274は $p-GaAs$ 層、275は $p-GaAs$  \*  
層、276は $p-GaAs$ 層、277は $p-GaAs$ 層、278は \*  
 $p-GaAs$ 層、279は $p-GaAs$ 層、280は $p-GaAs$ 層、 \*  
281は $p-GaAs$ 層、282は $p-GaAs$ 層、283は $p-GaAs$  \*  
層、284は $p-GaAs$ 層、285は $p-GaAs$ 層、286は \*  
 $p-GaAs$ 層、287は $p-GaAs$ 層、288は $p-GaAs$ 層、 \*  
289は $p-GaAs$ 層、290は $p-GaAs$ 層、291は $p-GaAs$  \*  
層、292は $p-GaAs$ 層、293は $p-GaAs$ 層、294は \*  
 $p-GaAs$ 層、295は $p-GaAs$ 層、296は $p-GaAs$ 層、 \*  
297は $p-GaAs$ 層、298は $p-GaAs$ 層、299は $p-GaAs$  \*  
層、300は $p-GaAs$ 層、301は $p-GaAs$ 層、302は \*  
 $p-GaAs$ 層、303は $p-GaAs$ 層、304は $p-GaAs$ 層、 \*  
305は $p-GaAs$ 層、306は $p-GaAs$ 層、307は $p-GaAs$  \*  
層、308は $p-GaAs$ 層、309は $p-GaAs$ 層、310は \*  
 $p-GaAs$ 層、311は $p-GaAs$ 層、312は $p-GaAs$ 層、 \*  
313は $p-GaAs$ 層、314は $p-GaAs$ 層、315は $p-GaAs$  \*  
層、316は $p-GaAs$ 層、317は $p-GaAs$ 層、318は \*  
 $p-GaAs$ 層、319は $p-GaAs$ 層、320は $p-GaAs$ 層、 \*  
321は $p-GaAs$ 層、322は $p-GaAs$ 層、323は $p-GaAs$  \*  
層、324は $p-GaAs$ 層、325は $p-GaAs$ 層、326は \*  
 $p-GaAs$ 層、327は $p-GaAs$ 層、328は $p-GaAs$ 層、 \*  
329は $p-GaAs$ 層、330は $p-GaAs$ 層、331は $p-GaAs$  \*  
層、332は $p-GaAs$ 層、333は $p-GaAs$ 層、334は \*  
 $p-GaAs$ 層、335は $p-GaAs$ 層、336は $p-GaAs$ 層、 \*  
337は $p-GaAs$ 層、338は $p-GaAs$ 層、339は $p-GaAs$  \*  
層、340は $p-GaAs$ 層、341は $p-GaAs$ 層、342は \*  
 $p-GaAs$ 層、343は $p-GaAs$ 層、344は $p-GaAs$ 層、 \*  
345は $p-GaAs$ 層、346は $p-GaAs$ 層、347は $p-GaAs$  \*  
層、348は $p-GaAs$ 層、349は $p-GaAs$ 層、350は \*  
 $p-GaAs$ 層、351は $p-GaAs$ 層、352は $p-GaAs$ 層、 \*  
353は $p-GaAs$ 層、354は $p-GaAs$ 層、355は $p-GaAs$  \*  
層、356は $p-GaAs$ 層、357は $p-GaAs$ 層、358は \*  
 $p-GaAs$ 層、359は $p-GaAs$ 層、360は $p-GaAs$ 層、 \*  
361は $p-GaAs$ 層、362は $p-GaAs$ 層、363は $p-GaAs$  \*  
層、364は $p-GaAs$ 層、365は $p-GaAs$ 層、366は \*  
 $p-GaAs$ 層、367は $p-GaAs$ 層、368は $p-GaAs$ 層、 \*  
369は $p-GaAs$ 層、370は $p-GaAs$ 層、371は $p-GaAs$  \*  
層、372は $p-GaAs$ 層、373は $p-GaAs$ 層、374は \*  
 $p-GaAs$ 層、375は $p-GaAs$ 層、376は $p-GaAs$ 層、 \*  
377は $p-GaAs$ 層、378は $p-GaAs$ 層、379は $p-GaAs$  \*  
層、380は $p-GaAs$ 層、381は $p-GaAs$ 層、382は \*  
 $p-GaAs$ 層、383は $p-GaAs$ 層、384は $p-GaAs$ 層、 \*  
385は $p-GaAs$ 層、386は $p-GaAs$ 層、387は $p-GaAs$  \*  
層、388は $p-GaAs$ 層、389は $p-GaAs$ 層、390は \*  
 $p-GaAs$ 層、391は $p-GaAs$ 層、392は $p-GaAs$ 層、 \*  
393は $p-GaAs$ 層、394は $p-GaAs$ 層、395は $p-GaAs$  \*  
層、396は $p-GaAs$ 層、397は $p-GaAs$ 層、398は \*  
 $p-GaAs$ 層、399は $p-GaAs$ 層、400は $p-GaAs$ 層、 \*  
401は $p-GaAs$ 層、402は $p-GaAs$ 層、403は $p-GaAs$  \*  
層、404は $p-GaAs$ 層、405は $p-GaAs$ 層、406は \*  
 $p-GaAs$ 層、407は $p-GaAs$ 層、408は $p-GaAs$ 層、 \*  
409は $p-GaAs$ 層、410は $p-GaAs$ 層、411は $p-GaAs$  \*  
層、412は $p-GaAs$ 層、413は $p-GaAs$ 層、414は \*  
 $p-GaAs$ 層、415は $p-GaAs$ 層、416は $p-GaAs$ 層、 \*  
417は $p-GaAs$ 層、418は $p-GaAs$ 層、419は $p-GaAs$  \*  
層、420は $p-GaAs$ 層、421は $p-GaAs$ 層、422は \*  
 $p-GaAs$ 層、423は $p-GaAs$ 層、424は $p-GaAs$ 層、 \*  
425は $p-GaAs$ 層、426は $p-GaAs$ 層、427は $p-GaAs$  \*  
層、428は $p-GaAs$ 層、429は $p-GaAs$ 層、430は \*  
 $p-GaAs$ 層、431は $p-GaAs$ 層、432は $p-GaAs$ 層、 \*  
433は $p-GaAs$ 層、434は $p-GaAs$ 層、435は $p-GaAs$  \*  
層、436は $p-GaAs$ 層、437は $p-GaAs$ 層、438は \*  
 $p-GaAs$ 層、439は $p-GaAs$ 層、440は $p-GaAs$ 層、 \*  
441は $p-GaAs$ 層、442は $p-GaAs$ 層、443は $p-GaAs$  \*  
層、444は $p-GaAs$ 層、445は $p-GaAs$ 層、446は \*  
 $p-GaAs$ 層、447は $p-GaAs$ 層、448は $p-GaAs$ 層、 \*  
449は $p-GaAs$ 層、450は $p-GaAs$ 層、451は $p-GaAs$  \*  
層、452は $p-GaAs$ 層、453は $p-GaAs$ 層、454は \*  
 $p-GaAs$ 層、455は $p-GaAs$ 層、456は $p-GaAs$ 層、 \*  
457は $p-GaAs$ 層、458は $p-GaAs$ 層、459は $p-GaAs$  \*  
層、460は $p-GaAs$ 層、461は $p-GaAs$ 層、462は \*  
 $p-GaAs$ 層、463は $p-GaAs$ 層、464は $p-GaAs$ 層、 \*  
465は $p-GaAs$ 層、466は $p-GaAs$ 層、467は $p-GaAs$  \*  
層、468は $p-GaAs$ 層、469は $p-GaAs$ 層、470は \*  
 $p-GaAs$ 層、471は $p-GaAs$ 層、472は $p-GaAs$ 層、 \*  
473は $p-GaAs$ 層、474は $p-GaAs$ 層、475は $p-GaAs$  \*  
層、476は $p-GaAs$ 層、477は $p-GaAs$ 層、478は \*  
 $p-GaAs$ 層、479は $p-GaAs$ 層、480は $p-GaAs$ 層、 \*  
481は $p-GaAs$ 層、482は $p-GaAs$ 層、483は $p-GaAs$  \*  
層、484は $p-GaAs$ 層、485は $p-GaAs$ 層、486は \*  
 $p-GaAs$ 層、487は $p-GaAs$ 層、488は $p-GaAs$ 層、 \*  
489は $p-GaAs$ 層、490は $p-GaAs$ 層、491は $p-GaAs$  \*  
層、492は $p-GaAs$ 層、493は $p-GaAs$ 層、494は \*  
 $p-GaAs$ 層、495は $p-GaAs$ 層、496は $p-GaAs$ 層、 \*  
497は $p-GaAs$ 層、498は $p-GaAs$ 層、499は $p-GaAs$  \*  
層、500は $p-GaAs$ 層、501は $p-GaAs$ 層、502は \*  
 $p-GaAs$ 層、503は $p-GaAs$ 層、504は $p-GaAs$ 層、 \*  
505は $p-GaAs$ 層、506は $p-GaAs$ 層、507は $p-GaAs$  \*  
層、508は $p-GaAs$ 層、509は $p-GaAs$ 層、510は \*  
 $p-GaAs$ 層、511は $p-GaAs$ 層、512は $p-GaAs$ 層、 \*  
513は $p-GaAs$ 層、514は $p-GaAs$ 層、515は $p-GaAs$  \*  
層、516は $p-GaAs$ 層、517は $p-GaAs$ 層、518は \*  
 $p-GaAs$ 層、519は $p-GaAs$ 層、520は $p-GaAs$ 層、 \*  
521は $p-GaAs$ 層、522は $p-GaAs$ 層、523は $p-GaAs$  \*  
層、524は $p-GaAs$ 層、525は $p-GaAs$ 層、526は \*  
 $p-GaAs$ 層、527は $p-GaAs$ 層、528は $p-GaAs$ 層、 \*  
529は $p-GaAs$ 層、530は $p-GaAs$ 層、531は $p-GaAs$  \*  
層、532は $p-GaAs$ 層、533は $p-GaAs$ 層、534は \*  
 $p-GaAs$ 層、535は $p-GaAs$ 層、536は $p-GaAs$ 層、 \*  
537は $p-GaAs$ 層、538は $p-GaAs$ 層、539は $p-GaAs$  \*  
層、540は $p-GaAs$ 層、541は $p-GaAs$ 層、542は \*  
 $p-GaAs$ 層、543は $p-GaAs$ 層、544は $p-GaAs$ 層、 \*  
545は $p-GaAs$ 層、546は $p-GaAs$ 層、547は $p-GaAs$  \*  
層、548は $p-GaAs$ 層、549は $p-GaAs$ 層、550は \*  
 $p-GaAs$ 層、551は $p-GaAs$ 層、552は $p-GaAs$ 層、 \*  
553は $p-GaAs$ 層、554は $p-GaAs$ 層、555は $p-GaAs$  \*  
層、556は $p-GaAs$ 層、557は $p-GaAs$ 層、558は \*  
 $p-GaAs$ 層、559は $p-GaAs$ 層、560は $p-GaAs$ 層、 \*  
561は $p-GaAs$ 層、562は $p-GaAs$ 層、563は $p-GaAs$  \*  
層、564は $p-GaAs$ 層、565は $p-GaAs$ 層、566は \*  
 $p-GaAs$ 層、567は $p-GaAs$ 層、568は $p-GaAs$ 層、 \*  
569は $p-GaAs$ 層、570は $p-GaAs$ 層、571は $p-GaAs$  \*  
層、572は $p-GaAs$ 層、573は $p-GaAs$ 層、574は \*  
 $p-GaAs$ 層、575は $p-GaAs$ 層、576は $p-GaAs$ 層、 \*  
577は $p-GaAs$ 層、578は $p-GaAs$ 層、579は $p-GaAs$  \*  
層、580は $p-GaAs$ 層、581は $p-GaAs$ 層、582は \*  
 $p-GaAs$ 層、583は $p-GaAs$ 層、584は $p-GaAs$ 層、 \*  
585は $p-GaAs$ 層、586は $p-GaAs$ 層、587は $p-GaAs$  \*  
層、588は $p-GaAs$ 層、589は $p-GaAs$ 層、590は \*  
 $p-GaAs$ 層、591は $p-GaAs$ 層、592は $p-GaAs$ 層、 \*  
593は $p-GaAs$ 層、594は $p-GaAs$ 層、595は $p-GaAs$  \*  
層、596は $p-GaAs$ 層、597は $p-GaAs$ 層、598は \*  
 $p-GaAs$ 層、599は $p-GaAs$ 層、600は $p-GaAs$ 層、 \*  
601は $p-GaAs$ 層、602は $p-GaAs$ 層、603は $p-GaAs$  \*  
層、604は $p-GaAs$ 層、605は $p-GaAs$ 層、606は \*  
 $p-GaAs$ 層、607は $p-GaAs$ 層、608は $p-GaAs$ 層、 \*  
609は $p-GaAs$ 層、610は $p-GaAs$ 層、611は $p-GaAs$  \*  
層、612は $p-GaAs$ 層、613は $p-GaAs$ 層、614は \*  
 $p-GaAs$ 層、615は $p-GaAs$ 層、616は $p-GaAs$ 層、 \*  
617は $p-GaAs$ 層、618は $p-GaAs$ 層、619は $p-GaAs$  \*  
層、620は $p-GaAs$ 層、621は $p-GaAs$ 層、622は \*  
 $p-GaAs$ 層、623は $p-GaAs$ 層、624は $p-GaAs$ 層、 \*  
625は $p-GaAs$ 層、626は $p-GaAs$ 層、627は $p-GaAs$  \*  
層、628は $p-GaAs$ 層、629は $p-GaAs$ 層、630は \*  
 $p-GaAs$ 層、631は $p-GaAs$ 層、632は $p-GaAs$ 層、 \*  
633は $p-GaAs$ 層、634は $p-GaAs$ 層、635は $p-GaAs$  \*  
層、636は $p-GaAs$ 層、637は $p-GaAs$ 層、638は \*  
 $p-GaAs$ 層、639は $p-GaAs$ 層、640は $p-GaAs$ 層、 \*  
641は $p-GaAs$ 層、642は $p-GaAs$ 層、643は $p-GaAs$  \*  
層、644は $p-GaAs$ 層、645は $p-GaAs$ 層、646は \*  
 $p-GaAs$ 層、647は $p-GaAs$ 層、648は $p-GaAs$ 層、 \*  
649は $p-GaAs$ 層、650は $p-GaAs$ 層、651は $p-GaAs$  \*  
層、652は $p-GaAs$ 層、653は $p-GaAs$ 層、654は \*  
 $p-GaAs$ 層、655は $p-GaAs$ 層、656は $p-GaAs$ 層、 \*  
657は $p-GaAs$ 層、658は $p-GaAs$ 層、659は $p-GaAs$  \*  
層、660は $p-GaAs$ 層、661は $p-GaAs$ 層、662は \*  
 $p-GaAs$ 層、663は $p-GaAs$ 層、664は $p-GaAs$ 層、 \*  
665は $p-GaAs$ 層、666は $p-GaAs$ 層、667は $p-GaAs$  \*  
層、668は $p-GaAs$ 層、669は $p-GaAs$ 層、670は \*  
 $p-GaAs$ 層、671は $p-GaAs$ 層、672は $p-GaAs$ 層、 \*  
673は $p-GaAs$ 層、674は $p-GaAs$ 層、675は $p-GaAs$  \*  
層、676は $p-GaAs$ 層、677は $p-GaAs$ 層、678は \*  
 $p-GaAs$ 層、679は $p-GaAs$ 層、680は $p-GaAs$ 層、 \*  
681は $p-GaAs$ 層、682は $p-GaAs$ 層、683は $p-GaAs$  \*  
層、684は $p-GaAs$ 層、685は $p-GaAs$ 層、686は \*  
 $p-GaAs$ 層、687は $p-GaAs$ 層、688は $p-GaAs$ 層、 \*  
689は $p-GaAs$ 層、690は $p-GaAs$ 層、691は $p-GaAs$  \*  
層、692は $p-GaAs$ 層、693は $p-GaAs$ 層、694は \*  
 $p-GaAs$ 層、695は $p-GaAs$ 層、696は $p-GaAs$ 層、 \*  
697は $p-GaAs$ 層、698は $p-GaAs$ 層、699は $p-GaAs$  \*  
層、700は $p-GaAs$ 層、701は $p-GaAs$ 層、702は \*  
 $p-GaAs$ 層、703は $p-GaAs$ 層、704は $p-GaAs$ 層、 \*  
705は $p-GaAs$ 層、706は $p-GaAs$ 層、707は $p-GaAs$  \*  
層、708は $p-GaAs$ 層、709は $p-GaAs$ 層、710は \*  
 $p-GaAs$ 層、711は $p-GaAs$ 層、712は $p-GaAs$ 層、 \*  
713は $p-GaAs$ 層、714は $p-GaAs$ 層、715は $p-GaAs$  \*  
層、716は $p-GaAs$ 層、717は $p-GaAs$ 層、718は \*  
 $p-G$

(11)

特開平8-64614

19

s層106から電子の供給を受けるアンドープInGaAs層、108はアンドープInGaAs層107中に形成される2次元電子ガス層、109はアンドープInGaAs層107の下に形成されたアンドープGaAs層、110はアンドープGaAs層109の下に形成された半絶縁性のGaAs基板である。

【0124】半絶縁性のGaAs基板110の(311)A面上に高電子移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor、以下HEMTという)を成長した場合にも、次のような効果が期待される。

【0125】HEMTのキャリアはn-AlGaAsキャリア供給層からアンドープInGaAs層に供給される。固体ソースMBEを用いて形成したキャリア供給層であるn-AlGaAs層107中に酸素が混入されている。しかし、(311)A面上に成長することで酸素が低減され、キャリアの活性化率が向上し、素子特性(シートキャリア濃度Nsの増化に伴い、相互コンダクタンスgmが増化、雑音指数NFが低くなる。またシートキャリア濃度Nsの増化に伴い出力特性等の向上が期待される。)も向上する。

【0126】なお、半絶縁性のGaAs基板として(311)B面を有するものを用い、その(311)B面上にエピタキシャル成長層を形成する場合においても同様の効果を奏する。

【0127】

【発明の効果】以上のように請求項1記載の発明のヘテロ接合バイポーラトランジスタによれば、エミッタ層のn-AlGaAs中の酸素濃度を $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下にしたので、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響を減らすことができ、固体ソース分子線エピタキシーを用いて、高い電流増幅率 $\beta$ を安定に得ることができるという効果がある。

【0128】請求項2記載の発明のヘテロ接合バイポーラトランジスタによれば、エミッタ層のn-AlGaAs中の酸素濃度を $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ より小さくしたので、V<sub>BE</sub>のベース層内での再結合電流成分に比べてエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響を無視できる程度に小さくすることができ、固体ソース分子線エピタキシーを用いて、高い電流増幅率 $\beta$ を安定に得ることができるという効果がある。

【0129】請求項3記載の発明のヘテロ接合バイポーラトランジスタによれば、エミッタ層のn-AlGaAs中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ より小さくしたので、温度依存係数を低く抑えることができ、固体ソース分子線エピタキシーを用いて、高出力ヘテロ接合バイポーラトランジスタの高性能化を図ることができるという効果がある。

【0130】請求項4記載の発明のAlGaAsエピタキシャル成長層によれば、含有する酸素の濃度を $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下にしたので、例えば、ヘテロ接合バイ

20

ポーラトランジスタのエミッタ層の材料として用いることにより、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの動作特性を向上させることができるなど、トランジスタの材料に適した、固体ソース分子線エピタキシーによって形成されるエピタキシャル層を提供できるという効果がある。

【0131】請求項5記載の発明のAlGaAsエピタキシャル成長層によれば、含有する酸素の濃度を $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ より小さくしたので、例えば、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として用いることにより、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの動作特性を向上させることができるなど、トランジスタの材料に適した、固体ソース分子線エピタキシーによって形成されるAlGaAsエピタキシャル層を提供できるという効果がある。

【0132】請求項6記載の発明のAlGaAsエピタキシャル成長層によれば、含有する酸素の濃度を $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ より小さくしたので、例えば、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として用いることにより、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの動作特性を向上させることができるなど、トランジスタの材料に適した、固体ソース分子線エピタキシーによって形成されるAlGaAsエピタキシャル成長層を提供できるという効果がある。

【0133】請求項7記載の発明の結晶成長方法によれば、成長速度を $0.5 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以上でAlGaAsを結晶成長するので、例えば、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層に結晶成長させることによって、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの電流増幅率を向上させることができるなど、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの特性を向上させることができるという効果がある。

【0134】請求項8記載の発明の結晶成長方法によれば、成長速度を $1.0 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以下で結晶成長するので、例えば、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層に結晶成長させることによって、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの電流増幅率を向上させることができるなど、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの特性を向上させることができるという効果がある。

【0135】請求項9記載の発明の結晶成長方法によれば、AlGaAsの結晶成長用基板としてGaAs基板の(311)A面あるいは(311)B面を用いることで、成長させた結晶中の酸素濃度を減少させることができ、例えば、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として用いることにより、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの動作特性を向上させることができるなど、トランジスタの材料に適した、固体ソース分子線エピタキシーによって形成されるAlGaAsエピタキシャル成長層を提供できるという効果がある。

【0136】請求項10記載の発明の結晶成長方法によれば、n-AlGaAs中の酸素濃度を $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

(12)

特開平 8-64614

21

22

以下に制御しつつ、固体ソース分子線エビタキシーを用いて、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるので、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響を減らすことができ、膜厚の均一性及び制御性の良い製造方法によって安定で高い電流増幅率 $\beta$ を有するヘテロ接合バイポーラトランジスタを得ることができるという効果がある。

【0137】請求項11記載の発明の結晶成長方法によれば、 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ より小さく制御しつつ、固体ソース分子線エビタキシーを用いて、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるので、ヘテロ接合バイポーラトランジスタにおいて、ベース層内での再結合電流成分に比べてエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響を無視できる程度に小さくすることができ、膜厚の均一性及び制御性の良い製造方法によって安定で高い電流増幅率 $\beta$ を有するヘテロ接合バイポーラトランジスタを得ることができるという効果がある。

【0138】請求項12記載の発明の結晶成長方法によれば、 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ より小さく制御しつつ、固体ソース分子線エビタキシーを用いて、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるので、温度依存係数 $\phi$ を低く抑えることができ、膜厚の均一性及び制御性の良い製造方法を用いて高性能な高出力ヘテロ接合バイポーラトランジスタを得ることができるという効果がある。

【0139】請求項13記載の発明の結晶成長方法によれば、 $n\text{-AlGaAs}$ または $\text{InGaAs}$ の成長用に $\text{GaAs}$ 基板に(311)A面または(311)B面のものを用いるので、高電子移動度トランジスタにおいてシートキャリア濃度 $N_s$ を向上して、相互コンダクタンス $g_m$ の向上、ノイズ指数NFの低減化、出力特性の向上等が改良できるという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明の第1実施例によるエミッタ層中の侵入酸素濃度と $1/\beta$ 及び $1/\beta_{\text{eff}}$ との関係を示すグラフである。

【図2】 この発明の第1実施例によるエミッタ・ベース接合部偏析酸素濃度と $1/\beta$ 及び $1/\beta_{\text{eff}}$ との関係

を示すグラフである。

【図3】 この発明の第1実施例によるエミッタ層中の酸素濃度とエミッタ・ベース接合部酸素濃度との関係を示すグラフである。

【図4】 この発明の第1実施例による成長速度と寿命との関係を示すグラフである。

【図5】 図4に示したグラフを得るために用いた試料の構成を示す模式図である。

【図6】 この発明の第1実施例による成長速度と $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 単一量子井戸の第一準位からのPL発光の半値幅、発光波長及び発光強度の関係を示すグラフである。

【図7】 図6に示したグラフを得るために用いた試料の構成を示す模式図である。

【図8】 この発明の第1実施例によるヘテロ接合バイポーラトランジスタの結晶中の酸素濃度と結晶の深さとの関係を示すグラフである。

【図9】 この発明の第2実施例によるヘテロ接合バイポーラトランジスタの結晶中の酸素濃度と結晶の深さとの関係を示すグラフである。

【図10】 この発明の第2実施例によるエミッタ層中の酸素濃度と $V_E$ の温度依存係数 $\phi$ との関係を示すグラフである。

【図11】 この発明の第3実施例による単一量子井戸構造PL発光寿命の成長基板面方位依存性を示すグラフである。

【図12】 ヘテロ接合バイポーラトランジスタの構成を示す断面図である。

【図13】 従来のヘテロ接合バイポーラトランジスタの結晶中の酸素濃度と結晶の深さとの関係を示すグラフである。

【図14】 高電子移動度トランジスタの構成を示す断面図である。

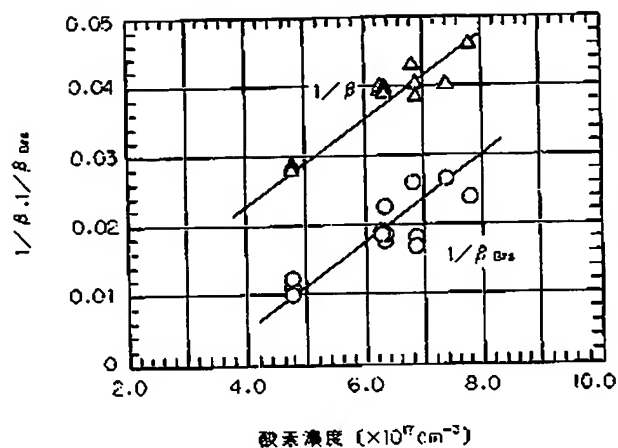
【符号の説明】

101 ソース、102 ゲート、103 フレイン、104、105  $n\text{-GaAs}$ 層、106  $n\text{-AlGaAs}$ 層、107 アンダーリンGaAs層、109 アンダーGaAs層、110 GaAs基板。

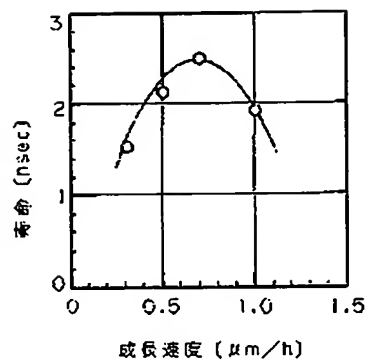
(13)

特開平8-64614

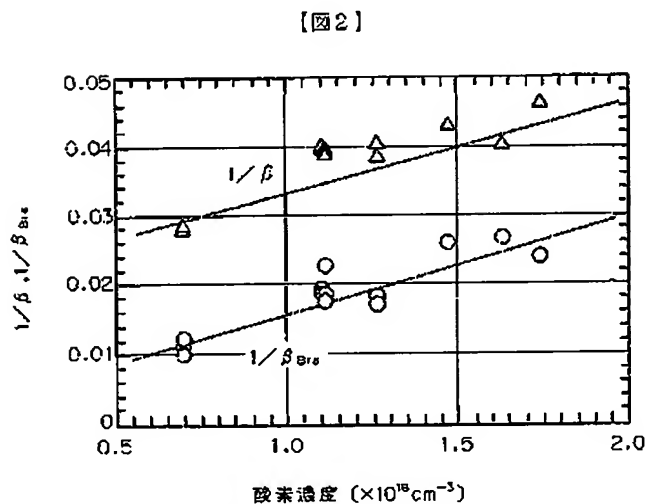
【図1】



【図4】



【図5】



51	i-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As,	2000Å
50	i-GaAs,	1000Å
52	i-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As,	2000Å
	p-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As,	500Å
	i-GaAs,	500Å
	SLB	3000Å
	LEC GaAs Sub.	

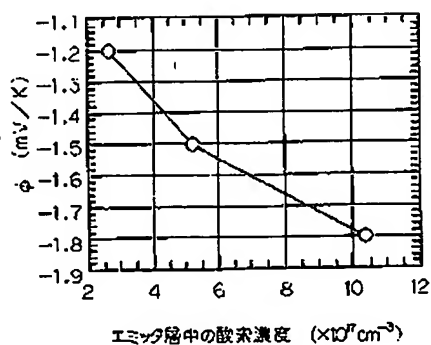
 $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 

【図7】

71	i-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As,	2000Å
70	i-GaAs,	1000Å
72	i-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As,	2000Å
	p-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As,	500Å
	i-GaAs,	3000Å
	SLB	
	LEC GaAs Sub.	

 $\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 

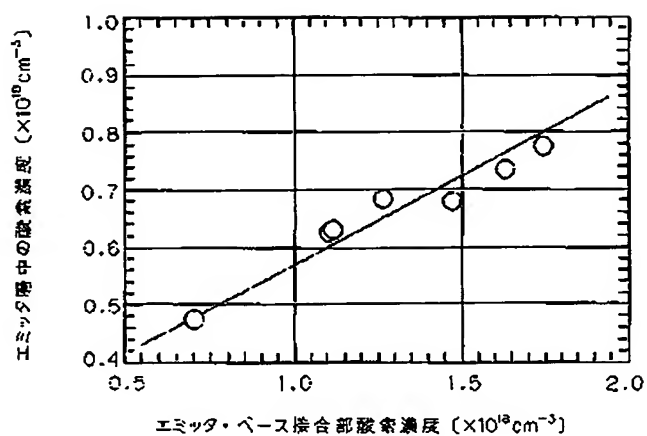
【図10】



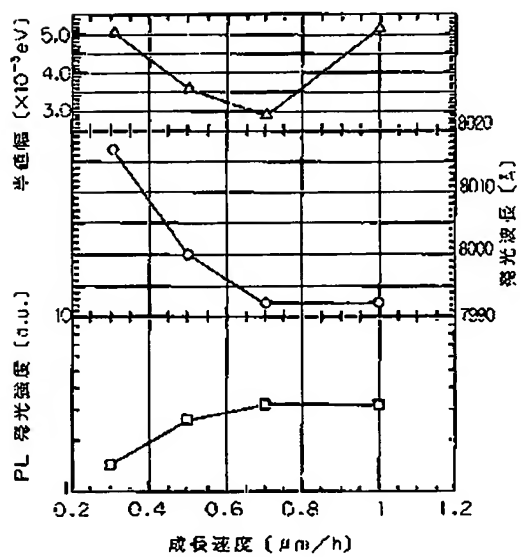
(14)

特開平8-64614

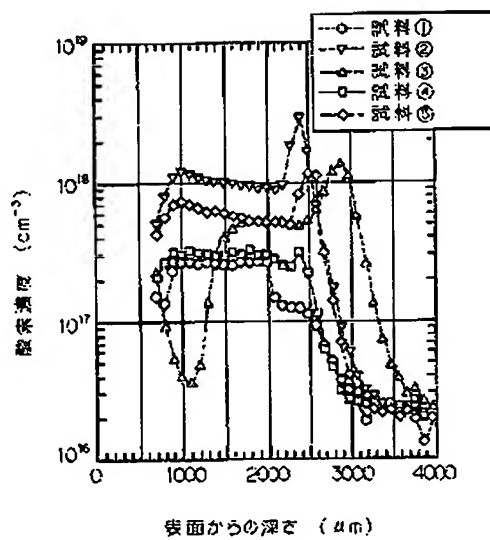
【図3】



【図6】



【図9】

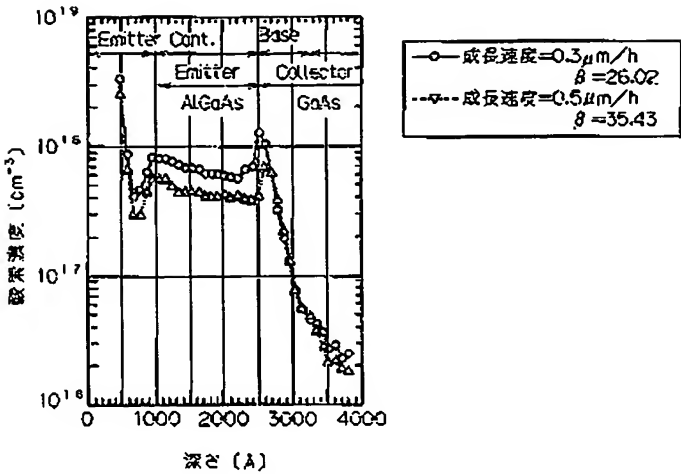




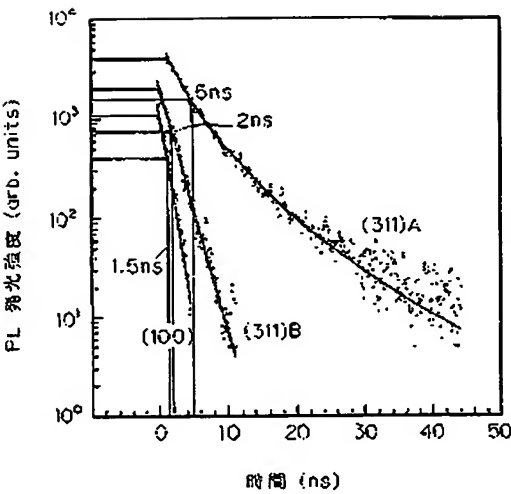
(15)

特開平 8 - 6 4 6 1 4

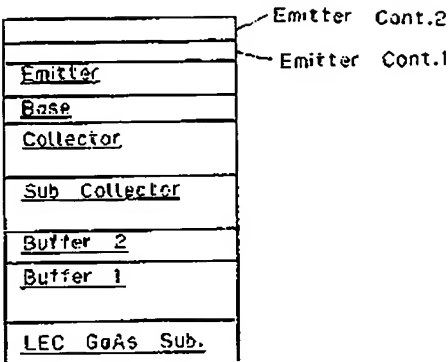
【図 8】



【図 11】



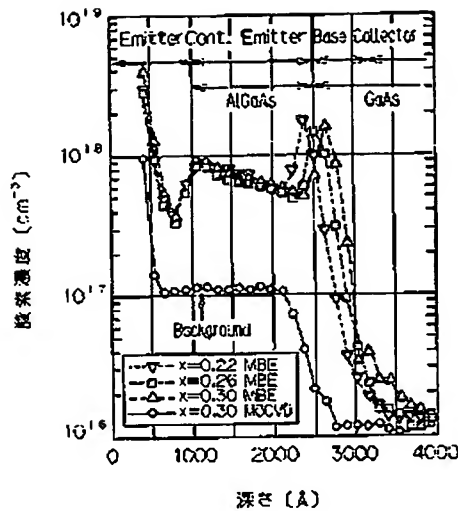
【図 12】



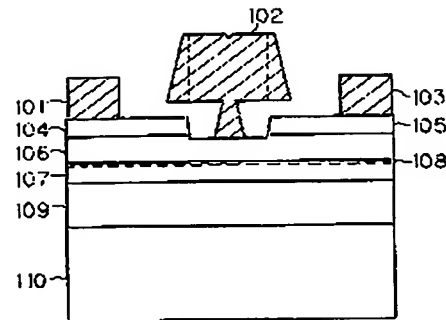
(15)

特開平8-64614

【図13】



【図14】



101:ソース  
102:ゲート  
103:ドレイン

【手続修正音】

【提出日】平成7年5月24日

【手続修正1】

【補正対象音類名】明細書

【補正対象項目名】0077

【補正方法】変更

【補正内容】

【0077】そして、エピタキシャル成長させた結晶を用いてHBTを試作した。試作したHBTのエミッタサイズは $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ である。電流増幅率 $\beta$ の測定点は、コレクタ電流 $I_c = 100 \mu\text{A} / (50 \times 50 \mu\text{m}^2)$ 、電流密度にして $4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ である。ガンメルプロットにおけるエミッター・コレクタ間電圧 $V_{CE} = 3.0 \text{ V}$ とし、この条件下で $n_c$ 、 $n_b$ を測定した。酸素の定量はAlGaAs定量用校正標準試料を用いて、2次イオン質量分析法(SIMS)で行った。

【手続修正2】

【補正対象音類名】明細書

【補正対象項目名】0078

【補正方法】変更

【補正内容】

【0078】以上の関係から明らかなように、酸素の侵入量の低減が電流増幅率 $\beta$ の向上に対してリニアに影響していることがわかる。また、 $1/\beta$ 及び $1/\beta_{amb}$ の酸素濃度に対する変化量が等しいことから、エピタキシャル成長層の同一構造での電流増幅率 $\beta$ の違いはエミッター・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{amb}$ の寄与の違いと考えられ、ベースからエミッタ層へのAlGaAs層

の結晶性（侵入酸素量の多少）が電流増幅率 $\beta$ の初期値を決定する重要な要因であることが分かる。

【手続修正3】

【補正対象音類名】明細書

【補正対象項目名】0079

【補正方法】変更

【補正内容】

【0079】数12で示したように現状のMBEで成長したHBTの結晶ではベース層内での再結合電流成分 $\beta_{amb}$ が支配的であり、このパラメータは結晶構造（ベース濃度、ベース層厚等）でほとんど決まってしまう。従って、まず、エミッター・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{amb}$ をベース層内での再結合電流成分 $\beta_{amb}$ に比較して小さくできればよいことになる。

【手続修正4】

【補正対象音類名】明細書

【補正対象項目名】0080

【補正方法】変更

【補正内容】

【0080】そこで、ベース層内での再結合電流成分 $\beta_{amb}$ について考察する。拡散長 $L_b$ が $2900 \sim 3100$ オングストロームとばらついて求まる。そこで、ベース濃度が $1.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ で、ベース層厚が $700$ オングストロームとすると、数9によれば、 $L_b = 2900$ オングストロームの場合は、 $\beta_{amb} = 2.927 \times 10^{-1}$ であり、 $L_b = 3100$ オングストロームの場合は、 $\beta_{amb} = 2.56 \times 10^{-1}$ である。

(17)

特開平8-64614

【手続補正5】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0081

【補正方法】変更

【補正内容】

【0081】これに対して図1から $\beta_{\text{eff}}$ を求めると、 $1/\beta_{\text{eff}}$ が $1/\beta - 1/\beta_{\text{eff}}$ にはほぼ等しい。これは図1より求められる。 $1/\beta_{\text{eff}}$ は常に一定であると仮定しているため、 $1/\beta_{\text{eff}} = 0$ となるx切片での $1/\beta$ の値が $1/\beta_{\text{eff}}$ になる。

【手続補正6】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0082

【補正方法】変更

【補正内容】

【0082】これは直線をどのように引くかに依存するが、大きく見積もっても $2 \times 10^{-1}$ 程度で、数9から求められる $\beta_{\text{eff}}$ と一致しない。これは数9で $\beta_{\text{eff}} = \beta$ と仮定した $V_{\text{eff}}$ が十分に $\beta$ を飽和させていない値であったことが主な原因であり、正確には $V_{\text{eff}}$ に対して $\beta$ が飽和した値はもう少し高く、 $1/\beta_{\text{eff}} (= 1/\beta)$ は $2.69 \times 10^{-1}$ より低くなるのは妥当と考えられる。従って、図1より求めた $1/\beta_{\text{eff}} = 1.9 \times 10^{-1}$ （ベース層内での再結合電流成分 $\beta_{\text{eff}}$ が主要因とした場合の電流増幅率は52.6である。）の方がより正確な値といえる。

【手続補正7】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0083

【補正方法】変更

【補正内容】

【0083】エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{eff}}$ をベース層内での再結合電流成分 $\beta_{\text{eff}}$ より小さくすることによって、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{eff}}$ の寄与を効果的に減少させることができる。このことから、好ましくは、 $1/\beta_{\text{eff}} < 1.9 \times 10^{-1}$ とすればよい。そのためには、図1に示したグラフから融素濃度が $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度以下にすることが望ましいことがわかる。

【手続補正8】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0084

【補正方法】変更

【補正内容】

【0084】さらに好ましくは、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分 $\beta_{\text{eff}}$ をベース層内での再結合電流成分 $\beta_{\text{eff}}$ と比較して十分に小さくできればよい。そこで、 $1/\beta_{\text{eff}}$ を十分小さな値である $2 \times 10^{-2}$ （ベース層内での再結合電流成分 $\beta_{\text{eff}}$ が主要因とした場合の電流増幅率は500である。）程度より小さくする

には、図1を用いて逆算すると、低減すべき融素濃度は $\text{AlGaAs}$ で形成されたエミッタ層中で $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さいと見積もることができる。

【手続補正9】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0087

【補正方法】変更

【補正内容】

【0087】また、評価した単一量子井戸（以下SQWという。）のエピタキシャル成長層の構造は図5に示す。図5において、50はGaAsで形成された井戸層、51、52は井戸層50を挟む $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ で形成された層である。固体ソースMBEにより形成されたエピタキシャル成長層の成長速度依存性については、井戸層50であるGaAs層のみ励起し、その際に発生される蛍光寿命によって評価した。そして、SQWの蛍光寿命は、数13のような関係式で示される。

【手続補正10】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0089

【補正方法】変更

【補正内容】

【0089】ここで、 $\tau$ はSQWの蛍光寿命、 $\tau_{\text{eff}}$ は輻射再結合寿命、 $\tau_{\text{nr}}$ は非輻射再結合寿命でバルク再結合成分と界面再結合成分に分類できる。 $\tau_{\text{nr}}$ は非輻射再結合寿命でバルク再結合成分を示し、 $S$ は界面再結合速度である。 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ヘテロ界面での再結合速度は、ほぼ $10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ オーダーと一般的に大きく、GaAs井戸層40が薄い場合には蛍光寿命が極端に短くなるため、井戸層厚は1000オングストロームとする。

【手続補正11】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0094

【補正方法】変更

【補正内容】

【0094】MBEの成長速度を変化させた場合のSQW第一準位からのPL発光の依存性を図6にまとめる。図6は、GaAs/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 単一量子井戸第一準位からのフォトルミネッセンス発光の半値幅、発光波長及び発光強度の成長速度依存性を示すグラフである。図6において、横軸は成長速度、縦軸はそれぞれ半値幅、発光波長、発光強度を示す。また、評価した単一量子井戸（SQW）のエピタキシャル成長層の構造は図7に示す。図7において、70はGaAsで形成された井戸層、71、72は井戸層70を挟む $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ で形成された層である。それぞれの層の厚さは、井戸層70が100オングストローム、井戸層を挟む $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 層71、72が2000オングストロームである。

(18)

特開平8-64614

【手続補正12】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0103

【補正方法】変更

【補正内容】

【0103】ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数のばらつきとHBTの結晶中の酸素濃度との関係を明らかにするために、試料①から試料③について、HBTの結晶中の酸素濃度と温度依存係数 $\phi$ との関係を示すグラフを図10に示す。図において、横軸にはHBTの結晶中の酸素濃度、縦軸には温度依存係数 $\phi$ を目盛っている。

【手続補正13】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0104

【補正方法】変更

【補正内容】

【0104】図10から分かるように、HBTの温度依存係数 $\phi$ と結晶中の酸素濃度との間には、明瞭な相関があり、HBT結晶中酸素濃度の低下に伴い、ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ が低下している。ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ を結晶中酸素濃度により制御できる。ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ は、1.2以下に抑えることが望ましく、従って、酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下に抑えることが望ましい。1.2はHBTで高出力素子を形成する場合に実用化する上で一つの目安となる数値である。

【手続補正14】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0105

【補正方法】変更

【補正内容】

【0105】次に、エミッタ抵抗の温度及びバンドギャップの温度を考慮した場合のベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ について検討する。エミッタ電流 $I_E$ は数14で与えられる。

【手続補正15】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0107

【補正方法】変更

【補正内容】

【0107】エミッタ電流 $I_E$ の温度依存性を考慮して式を変形すると数15が得られ、それを数14を用いてさらに変形して数16が与えられる。

【手続補正16】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0110

【補正方法】変更

【補正内容】

【0110】 $\partial I_E / \partial T = 0$  (但し、 $I_E$ は一定) という条件のもとでは、数17が成り立つ。

【手続補正17】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0112

【補正方法】変更

【補正内容】

【0112】 $\partial R_E / \partial T = 0$ の時、ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ の値は、 $I_E$ を増加させると飽和することから数18が導かれる。

【手続補正18】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0114

【補正方法】変更

【補正内容】

【0114】ここで、 $I_E$ が $T$ に比例するとすると数19が導かれる。

【手続補正19】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0116

【補正方法】変更

【補正内容】

【0116】そして、 $n$ が3程度、 $E_g - qV_{BE}$ が0.1V程度、 $\partial E_g / \partial T$ が $-0.4 \text{ mV/K}$ 程度とすると、数19からベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ がほぼ $-1.1 \text{ mV/K}$ から $-1.2 \text{ mV}$ 程度となる。エミッタ電流 $I_E$ の増加に伴う温度上昇によるHBTの破壊を防止するためには、ベース・エミッタ間電圧 $V_{BE}$ の温度依存係数 $\phi$ の絶対値を $1.2 \text{ mV/K}$ より小さくするのが望ましいことがわかる。

【手続補正20】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0118

【補正方法】変更

【補正内容】

【0118】図11に $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{In}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 単一量子井戸(SQW)からのPL蛍光寿命の成長基板面方位依存性を示す。

【手続補正21】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0120

【補正方法】変更

【補正内容】

【0120】この(311)A面基板を用いてHBTを成長した場合、成長速度が $0.3 \mu\text{m/h}$ の場合で酸素濃度は、エミッタ層中平均値で $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下になる。この場合電流増幅率 $\beta$ はベース層内での再結合電流成分 $\beta_{rec}$ で決定される領域に至り、電流増幅率 $\beta$ で40程度の値が得られる。成長速度が $0.5 \mu\text{m/h}$ の

(19)

特開平8-64614

場合には酸素濃度がAlGaAs層中で $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下に至り、同様に電流増幅率 $\beta$ で40の値が得られる。

【手続補正22】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0121

【補正方法】変更

【補正内容】

【0121】上記のように(311)A面上にHBTを成長することで少数キャリアの寿命が(100)面上に成長した場合に比較して長くなることで、電流増幅率 $\beta$ で40とベース層内での再結合電流成分 $\beta_{rec}$ によって決まる値に安定する。これはn-AlGaAs中混入酸素量を低減できたことに起因する。

【手続補正23】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0123

【補正方法】変更

【補正内容】

【0123】実施例4。次に、この発明の第4実施例による高電子移動度トランジスタの製造方法について説明する。図14は、InGaAs/GaAs系疑似整合系高電子移動度トランジスタの構造を示す断面図である。図において、101はソース、102はゲート、103はドレイン、104はソース101の下に形成されたn'-GaAs層、105はドレイン103の下に形成されたn'-GaAs層、106はゲート102及びn'-GaAs層104、105の下に形成され電子供給層として働くn-AlGaAs層、107はn-AlGaAs層106から電子の供給を受けるアンドープInGaAs層、108はアンドープInGaAs層107中に形成される2次元電子ガス層、109はアンドープInGaAs層107の下に形成されたアンドープGaAs層、110はアンドープGaAs層109の下に形成された半絶縁性のGaAs基板である。

【手続補正24】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0127

【補正方法】変更

【補正内容】

【0127】

【発明の効果】以上のように請求項1記載の発明のヘテロ接合バイポーラトランジスタによれば、エミッタ層のn-AlGaAs中の酸素濃度を $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下にしたので、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響を減らすことができ、固体ソース分子線エビタキシーを用いて、高い電流増幅率 $\beta$ を安定に得ることができるという効果がある。

【手続補正25】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0128

【補正方法】変更

【補正内容】

【0128】請求項2記載の発明のヘテロ接合バイポーラトランジスタによれば、エミッタ層のn-AlGaAs中の酸素濃度を $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さくしたので、 $V_{BE}$ のベース層内での再結合電流成分に比べてエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響を無視できる程度に小さくすることができ、固体ソース分子線エビタキシーを用いて、高い電流増幅率 $\beta$ を安定に得ることができるという効果がある。

【手続補正26】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0129

【補正方法】変更

【補正内容】

【0129】請求項3記載の発明のヘテロ接合バイポーラトランジスタによれば、エミッタ層のn-AlGaAs中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さくしたので、温度依存係数を低く抑えることができ、固体ソース分子線エビタキシーを用いて、高出力ヘテロ接合バイポーラトランジスタの高性能化を図ることができるという効果がある。

【手続補正27】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0130

【補正方法】変更

【補正内容】

【0130】請求項4記載の発明のAlGaAsエビタキシャル成長層によれば、含有する酸素の濃度を $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下にしたので、例えば、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として用いることにより、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの動作特性を向上させることができるなど、トランジスタの材料に適した、固体ソース分子線エビタキシーによって形成されるエビタキシャル層を提供できるという効果がある。

【手続補正28】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0131

【補正方法】変更

【補正内容】

【0131】請求項5記載の発明のAlGaAsエビタキシャル成長層によれば、含有する酸素の濃度を $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ よりも小さくしたので、例えば、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として用いることにより、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの動作特性を向上させることができるなど、トランジスタの材料に適した、固体ソース分子線エビタキシーによって形成されるAlGaAsエビタキシャル層を提供できるという効果がある。

(20)

特開平8-64614

【手続補正29】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0132

【補正方法】変更

【補正内容】

【0132】請求項6記載の発明のAlGaAsエピタキシャル成長層によれば、含有する酸素の濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さくしたので、例えば、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層の材料として用いることにより、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの動作特性を向上させることができるなど、トランジスタの材料に適した、固体ソース分子線エピタキシーによって形成されるAlGaAsエピタキシャル成長層を提供できるという効果がある。

【手続補正30】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0136

【補正方法】変更

【補正内容】

【0136】請求項10記載の発明の結晶成長方法によれば、 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下に制御しつつ、固体ソース分子線エピタキシーを用いて、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるので、エミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響を減らすことができ、膜厚の均一性及び制御性の良い製造方法によって安定で高い電流増幅率 $\beta$ を有するヘテロ接合バイポーラトランジスタを得ることができるという効果がある。

【手続補正31】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0137

【補正方法】変更

【補正内容】

【0137】請求項11記載の発明の結晶成長方法によれば、 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく制御しつつ、固体ソース分子線エピタキシーを用いて、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるので、ヘテロ接合バイポーラトランジスタにおいて、ベース層内での再結合電流成分に比べてエミッタ・ベース接合部での再結合電流成分の影響を無視できる程度に小さくすることができ、膜厚の均一性及び制御性の良い製造方法によって安定で高い電流増幅率 $\beta$ を有するヘテロ接合バイポーラトランジスタを得ることができるという効果がある。

【手続補正32】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0138

【補正方法】変更

【補正内容】

【0138】請求項12記載の発明の結晶成長方法によれば、 $n\text{-AlGaAs}$ 中の酸素濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ より小さく制御しつつ、固体ソース分子線エピタキシーを用いて、ヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ層として結晶成長させるので、温度依存係数を低く抑えることができ、膜厚の均一性及び制御性の良い製造方法を用いて高性能な高出力ヘテロ接合バイポーラトランジスタを得ることができるという効果がある。

【手続補正33】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】図1

【補正方法】変更

【補正内容】

【図1】 この発明の第1実施例によるエミッタ層中の混入酸素濃度と $1/\beta$ 及び $1/\beta_{\text{sat}}$ との関係を示すグラフである。

【手続補正34】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】図2

【補正方法】変更

【補正内容】

【図2】 この発明の第1実施例によるエミッタ・ベース接合部偏析酸素濃度と $1/\beta$ 及び $1/\beta_{\text{sat}}$ との関係を示すグラフである。

【手続補正35】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】図10

【補正方法】変更

【補正内容】

【図10】 この発明の第2実施例によるエミッタ層中の酸素濃度と $V_{\text{BE}}$ の温度依存係数 $\phi$ との関係を示すグラフである。

【手続補正36】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】符号の説明

【補正方法】変更

【補正内容】

【符号の説明】

101 ソース、102 ゲート、103 フレイン、104、105  $n^+\text{-GaAs}$ 層、106  $n\text{-AlGaAs}$ 層、107 アンダーブレイク $n\text{-GaAs}$ 層、109 アンダーブレイク $\text{GaAs}$ 層、110  $\text{GaAs}$ 基板。

(21)

特開平 8 - 6 4 6 1 4

フロントページの続き

(51)Int.Cl.

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

H 0 1 L 29/205

29/778

21/338

29/812

9171-4M

H 0 1 L 29/80

H